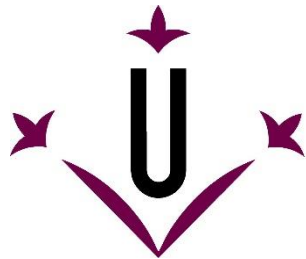


UNIVERSITAT DE LLEIDA

ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR D'ENGINYERIA AGRÀRIA



Universitat de Lleida
Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Agrària

TREBALL FINAL DE GRAU

**METODOLOGIA PER A L'ANÀLISI DE L'ERROR I LA VALIDACIÓ
DE TRES ESCÀNERS LÀSER TERRESTRES MÒBILS BASATS EN
SENSORS LIDAR I RGB-D EN LA CARACTERITZACIÓ DE
L'ARQUITECTURA D'ARBRES FRUITERS**

TREBALL PER OPTAR AL TÍTOL DE GRAU EN ENGINYERIA AGRÀRIA I ALIMENTÀRIA

PRESENAT PER

Bernat Lavaquiol Colell

TUTOR I COTUTOR

Ricardo Sanz Cortiella i Alexandre Escolà Agustí

Lleida, Juliol del 2018

Aquest treball final de grau ha estat desenvolupat gràcies al projecte *AgVANCE: Herramientas de base fotónica para la gestión agronómica y el uso de productos fitosanitarios sostenible en cultivos arbóreos en el marco de la agricultura de precisión* del Pla Estatal I+D+i Orientada als Reptes de la Societat i ha estat finançat pel Ministeri d'Economia i Competitivitat del Govern Espanyol.



AGL2013-48297-C2-2-R

Agraïments

A l'Àlex Escolà i el Ricardo Sanz per haver-me obert les portes a participar en aquest projecte. Vull agrair el seu entusiasme, la seva disponibilitat, la seva implicació i la seva capacitat de treball.

Al Jaume Arnó, agrair-li el seu ajut en tota la part de l'anàlisi estadística i, en especial, l'optimisme que transmet.

Al Joan Ramon Rosell, el Jordi Gené, l'Eduard Gregorio i el Jordi Llorens pel seu ajut en l'assaig i en el muntatge dels núvols de punts.

Al Manel Ribes, agrair-li la seva predisposició i ajut per realitzar la georeferenciació del patró.

Al José Sebastián Millán, agrair-li els seus consells per realitzar la part econòmica.

Finalment agrair a la família tot el suport que m'han donat durant el període que acabo entregant aquest projecte.

Índex general

1	Introducció	1
2	Objectius	2
3	Materials i mètodes	3
3.1	Generació del patró digital de referència	3
3.2	Validació del patró digital de referència	7
3.3	Sistemes d'escaneig de la vegetació MTLS.....	10
3.3.1	Sensor LiDAR Hokuyo UTM-30LX-EW	10
3.3.2	Sensor LiDAR Velodyne VLP-16	12
3.3.3	Sensor Microsoft Kinect 2.....	13
3.3.4	Receptor GNSS-RTK.....	14
3.3.5	Plataforma automotriu	15
3.4	Assaig de validació dels MTLS	16
3.4.1	Descripció de l'assaig	16
3.4.2	Georeferenciació del patró de referència.....	17
3.4.3	Protocol de l'assaig.....	18
3.5	Metodologia de validació dels MTLS	23
3.6	Estudi econòmic	25
4	Resultats i discussió.....	28
4.1	Validació del patró digital de referència	28
4.1.1	Validació del patró digital reduït.....	34
4.1.2	Validació del patró digital 18.....	37

4.1.3	Comparativa patró digital original i patró digital 18.....	41
4.2	Anàlisi dels errors dels MTLS	42
4.2.1	MTLS basat en el sensor Hokuyo UTM-30LX-EW	42
4.2.2	MTLS basat en el sensor Velodyne VLP-16	46
4.2.3	MTLS basat en el sensor Microsoft Kinect 2.....	49
4.2.4	Comparació dels tres MTLS	52
4.3	Estudi econòmic	56
5	Conclusions	62
6	Bibliografia	64

Índex de figures

Figura 1. Model d'arbre defoliat i fixat al palet.	3
Figura 2. Escena amb el model de referència durant la presa de fotografies.	4
Figura 3. Esquema de la situació de la presa de fotografies.....	4
Figura 4. Realització de les fotografies de la part superior de l'arbre.	5
Figura 5. Unió de les imatges realitzades a 0,77 m.	5
Figura 6. Punts entre els que es va mesurar la distància amb cinta mètrica per a realitzar l'escalat.	6
Figura 7. Núvol de punts 3D del patró real obtingut per fotogrametria que servirà de patró digital de referència.	7
Figura 8. Mesura dels diàmetres utilitzats per a calcular el diàmetre mitjà d'una de les llesques obtinguda en un dels punts mesurats.	8
Figura 9. Llesques de punts corresponents als XX punts de mesura de diàmetres realitzades al patró digital amb CloudCompare.	9
Figura 10. Vista del sensor LiDAR Hokuyo UTM-30LX-EW muntat sobre el gimbal....	10
Figura 11. Diagrama de la zona d'escaneig del sensor Hokuyo.....	11
Figura 12. Vista del sensor LiDAR Velodyne VLP-16.....	12
Figura 13. Vista del sensor Microsoft Kinect2.....	13
Figura 14. Base RTK formada pel receptor Leica GX1230 connectat a l'antena AX1203+GNSS situada a un punt de coordenades conegudes a l'edifici 4.	14
Figura 15. Plataforma automotriu dissenyada pel grup de recerca GRAP de la UdL base dels tres MTLS comparats.....	15
Figura 16. Escena de l'assaig de comparació de MTLS.	16
Figura 17. Element reflectant (de color gris) utilitzat per mesurar distàncies i angles amb l'estació total.	17
Figura 18. Estacionament de la base RTK sobre un punt de coordenades conegudes del terrat de l'edifici 4 de l'ETSEA.	18
Figura 19. Comprovació de les coordenades del punt A.	19
Figura 20. Col·locació de l'arbre en el punt on es vol realitzar l'escaneig.....	19
Figura 21. Estacionament de l'estació total sobre el punt A (fletxa vermella).	20
Figura 22. Elements reflectants situats a branques de l'arbre i al palet.	20
Figura 23. Escaneig MTLS basat en el sensor Hokuyo.	21
Figura 24. Mesura dels offsets del sensor Hokuyo.	21
Figura 25. Escaneig MTLS basat en el sensor Velodyne.	22
Figura 26. Escaneig MTLS basat en el sensor Kinect2.	23
Figura 27. Càlcul de la distància entre dos núvols de punts amb el mètode del punt veí més pròxim (CloudCompare).	24
Figura 28. Visualització dels resultats que proporciona l'eina "Cloud-to-Cloud Distance computation".	25
Figura 29. Modelització de l'error relatiu del patró digital en funció del diàmetre real..	29
Figura 30. Error absolut del diàmetre del patró digital en funció del diàmetre real, es mostra l'ajust lineal (vermell) i la mitja (en verd).	29

Figura 31. Representació de l'error absolut del patró digital en funció del diàmetre per als diàmetres inferiors a 10 mm.	30
Figura 32. Representació de l'error absolut del patró digital en funció del diàmetre per als diàmetres superiors a 10 mm.	31
Figura 33. Regressió lineal de les longituds del patró digital respecte les longituds reals.	33
Figura 34. Error relatiu del diàmetre del patró digital reduït en funció del diàmetre real.	35
Figura 35. Regressió lineal del diàmetre del patró digital reduït en funció del diàmetre del patró real.....	35
Figura 36. Error relatiu de les longituds del patró digital reduït en funció de la longitud del patró real.....	36
Figura 37. Error absolut dels diàmetres del patró digital 18 en funció dels diàmetres del patró real, es mostra l'ajust lineal en vermell i la mitjana en verd.	38
Figura 38. Error relatiu del diàmetre del patró digital 18 en funció del diàmetre del patró real.	39
Figura 39. Error relatiu de la longitud en funció de la longitud del patró real.....	40
Figura 40. Regressió lineal de la longitud del patró digital 18 en funció de la longitud del patró real.....	40
Figura 41. Patró digital original (blanc) i patró digital 18 (vermell).	41
Figura 42. Patró digital original acolorit en funció de l'error en relació al patró digital 18.	42
Figura 43. Núvols de punts obtingut amb el MTLs basat en el sensor Hokuyo escanejant a 0,5 km/h (esquerra) i escanejant a 2 km/h (dreta). El color dels punts indica la magnitud de l'error respecte del patró digital 18.....	43
Figura 44. Histograma d'errors absoluts del sistema MTLs basat en el sensor Hokuyo escanejant a 0,5 km/h (esquerra) i escanejant a 2 km/h (dreta).	45
Figura 45. Núvols de punts obtingut amb el MTLs basat en el sensor Velodyne escanejant a 0,5 km/h (esquerra) i escanejant a 2 km/h (dreta). El color dels punts indica la magnitud de l'error respecte del patró digital 18.....	46
Figura 46. Histograma de l'error del sistema MTLs basat en el sensor Velodyne escanejant a 0,5 km/h (esquerra) i escanejant a 2 km/h (dreta).	48
Figura 47. Núvols de punts obtingut amb el MTLs basat en el sensor Kinect2 escanejant a 0,5 km/h (esquerra) i escanejant a 2 km/h (dreta). El color dels punts indica la magnitud de l'error respecte del patró digital 18.....	49
Figura 48. Histograma de l'error del sistema MTLs basat en el sensor Kinect2 escanejant a 0,5 km/h (esquerra) i escanejant a 2 km/h (dreta).	51
Figura 49. Núvols de punts obtinguts amb el sistema MTLs basat en els diferents sensors. La fila 1 correspon a la velocitat de 0,5 km/h, la fila 2 correspon a 2 km/h i la fila 3 correspon al patró digital 18. La columna 1 correspon al sensor Hokuyo, la columna 2 correspon al sensor Velodyne i la columna 3 correspon al sensor Kinect2.....	54
Figura 50. Diagrama de caixes dels diferents núvols obtinguts amb el sistema MTLs basats en cada sensor a diferents velocitats (VA correspon a 2 km/h i VM correspon a 0,5 km/h).	55

Figura 51. Cost unitari (€/ha) del sistema MTL5 basant en el sensor Hokuyo escanejant a 0,5 km/h.	57
Figura 52. Cost unitari (€/ha) del sistema MTL5 basant en el sensor Hokuyo escanejant a 2 km/h.	57
Figura 53. Cost unitari (€/ha) del sistema MTL5 basant en el sensor Velodyne escanejant a 0,5 km/h.	58
Figura 54. Cost unitari (€/ha) del sistema MTL5 basant en el sensor Velodyne escanejant a 2 km/h.	59
Figura 55. Cost unitari (€/ha) del sistema MTL5 basant en el sensor Hokuyo2 escanejant a 0,5 km/h.	60
Figura 56. Cost unitari (€/ha) del sistema MTL5 basant en el sensor Hokuyo2 escanejant a 2 km/h.	61

Índex de taules

Taula 1. Posició del punt de coordenades conegudes del terrat de l'edifici 4 de l'ETSEA.	18
Taula 2. Coordenades del punt A.	19
Taula 3. Costos fixos del sistema MTLS basat en el sensor Hokuyo.	26
Taula 4. Costos fixos del sistema MTLS basat en el sensor Velodyne.	27
Taula 5. Costos fixos del sistema MTLS basat en el sensor Kinect 2.	27
Taula 6. Resultats del contrast de diferència de mitjanes.	28
Taula 7. Resum de l'ajust lineal.	30
Taula 8. Resultat del contrast de dades aparellades entre els diàmetres reals i els diàmetres del patró digital quan s'analitzen els diàmetres inferiors a 10 mm.	31
Taula 9. Resultat del contrast de dades aparellades entre els diàmetres reals i els diàmetres del patró digital quan s'analitzen els diàmetres superiors a 10 mm.	32
Taula 10. Resultat del contrast de dades aparellades entre les longituds reals i les longituds del patró digital.	32
Taula 11. Resultat del contrast de dades aparellades entre els diàmetres reals i els diàmetres del patró digital reduït.	34
Taula 12. Resultat del contrast de dades aparellades entre les longituds del patró real i les longituds del patró digital reduït.	36
Taula 13. Resultat del contrast de dades aparellades dels diàmetres reals i els diàmetres del patró digital 18.	37
Taula 14. Resum de l'ajust lineal.	38
Taula 15. Resultat del contrast de dades aparellades les longituds del patró real i les longituds del patró digital 18.	39
Taula 16. Anàlisi estadística dels errors absoluts i descompostos del núvol obtingut amb l'MTLS basat en el sensor Hokuyo escanejant a una velocitat d'avanç de 0,5 km/h.	44
Taula 17. Anàlisi estadística dels errors absoluts i descompostos del núvol obtingut amb l'MTLS basat en el sensor Hokuyo escanejant a una velocitat d'avanç de 2 km/h.	44
Taula 18. Anàlisi estadística dels errors absoluts i descompostos del núvol obtingut amb l'MTLS basat en el sensor Velodyne escanejant a una velocitat d'avanç de 0,5 km/h.	47
Taula 19. Anàlisi estadística dels errors absoluts i descompostos del núvol obtingut amb l'MTLS basat en el sensor Velodyne escanejant a una velocitat d'avanç de 2 km/h.	48
Taula 20. Anàlisi estadística dels errors absoluts i descompostos del núvol obtingut amb l'MTLS basat en el sensor Kinect2 escanejant a una velocitat d'avanç de 0,5 km/h.	50
Taula 21. Anàlisi estadística dels errors absoluts i descompostos del núvol obtingut amb l'MTLS basat en el sensor kinect escanejant a una velocitat d'avanç de 0 km/h.	51

Taula 22. Anàlisi estadística dels errors absoluts obtinguts amb l'MTLS basat en el sensor Hokuyo, el sensor Velodyne i el sensor Kinect2 escanejant a una velocitat d'avanç de 0,5 km/h.	52
Taula 23. Anàlisi estadística dels errors absoluts obtinguts amb l'MTLS basat en el sensor Hokuyo, el sensor Velodyne i el sensor Kinect2 escanejant a una velocitat d'avanç de 2 km/h.	53
Taula 24. Separació de mitjanes dels sistemes MTLS basats en els diferents sensors, escanejant a 0,5 i a 2 km/h.	56
Taula 25. Anàlisi de les despeses d'inversió del sistema MTLS basat en el sensor Hokuyo escanejant a 0,5 km/h.	56
Taula 26. Anàlisi de les despeses d'inversió del sistema MTLS basat en el sensor Hokuyo escanejant a 2 km/h.	57
Taula 27. Anàlisi de les despeses d'inversió del sistema MTLS basat en el sensor Velodyne escanejant a 0,5 km/h.	58
Taula 28. Anàlisi de les despeses d'inversió del sistema MTLS basat en el sensor Velodyne escanejant a 2 km/h.	59
Taula 29. Anàlisi de les despeses d'inversió del sistema MTLS basat en el sensor Kinect2 escanejant a 0,5 km/h.	60
Taula 30. Anàlisi de les despeses d'inversió del sistema MTLS basat en el sensor Kinect2 escanejant a 2 km/h.	60

Resum

Quan es desenvolupen sistemes de mesura basats en escàners làser terrestres mòbils (MTLS) per a caracteritzar l'arquitectura d'arbres fruiters es planteja la necessitat de validar els resultats obtinguts. Validar el núvol de punts resulta complicat ja que la resolució que s'obté amb les mesures manuals és molt inferior a la de que s'obté amb els sistemes desenvolupats. Per aquest motiu s'ha desenvolupat una metodologia que inclou la realització, mitjançant tècniques fotogramètriques d'alta definició, d'un patró digital de referència (núvol de punts 3D) amb el qual es comparen els núvols de punts obtinguts amb els sistemes MTLS.

La validació dels sistemes MTLS desenvolupats és necessari per a poder extreure informació de l'arquitectura de plantacions de fruiters i usar-les en el procés de presa de decisions.

En aquest treball es presenta una metodologia per a validar tres sistemes MTLS basats en els sensors Hokuyo, Velodyne i Kinect2 i un receptor RTK-GNSS. Els sistemes MTLS que s'estudien estan desenvolupats pel Grup de Recerca en AgròTICa i Agricultura de Precisió (GRAP) de la Universitat de Lleida. Aquest procediment va consistir en a) crear un patró digital generant un núvol de punts patró d'arbre en 3D usant tècniques fotogramètriques d'alta definició a partir d'un patró real (fruiter defoliat), b) comparar el patró digital amb el patró real per tal de validar-lo i c) validar els diferents sistemes MTLS comparant-los amb el patró digital.

Definicions prèvies i notacions

DEFINICIONS PRÈVIES

Concepte	Definició
<ul style="list-style-type: none"> Patró real 	Pomer (<i>Malus domestica</i> Bork.) plantat amb un sistema de formació amb eix central que va ser tallat l'any 2016.
<ul style="list-style-type: none"> Patró digital original 	Núvol de punts en 3D obtingut amb tècniques fotogramètriques d'alta definició a partir del patró real. La fotogrametria per a obtenir el patró digital original es va realitzar l'any 2016 (l'arbre estava hidratat).
<ul style="list-style-type: none"> Patró digital reduït 	Núvol de punts obtingut a partir de contraure un 6 % el patró digital original.
<ul style="list-style-type: none"> Patró digital 18 	Núvol de punts en 3D obtingut amb tècniques fotogramètriques d'alta definició a partir del patró real. La fotogrametria per a obtenir el patró digital original es va realitzar l'any 2018 (l'arbre estava deshidratat).
<ul style="list-style-type: none"> Resolució d'escaneig 	Velocitat en la que avança la plataforma automotriu que transporta el sistema MTLS.

SIGLES I ACRÒNIMS

Sigla/acrònim	Concepte
GPS	Sigla anglosaxona del sistema <i>Global Positioning System</i> , traduïble per Sistema de Posicionament Global.
GRAP	Grup de recerca en AgròTICa i Agricultura de Precisió
Làser	Neologisme originat per la sigla anglosaxona de l'expressió <i>light amplification by stimulated emissions of radiation</i> , emprada per a la designació d'una font de llum que utilitza l'emissió estimulada de radiació per a amplificar la llum i emetre un raig coherent i normalment d'alta monocromaticitat i direccionalitat.
LiDAR	Sigla anglosaxona de l'expressió <i>light detection and ranging</i> , emprada per a la designació de la tecnologia òptica que utilitza un feix de llum per a la detecció i quantificació de la distància a la que se situa un objecte que l'intercepta.

MTLS	Sigla anglosaxona de l'expressió <i>Mobile Terrestrial Laser Scanners</i> , traduïble per escàners làser terrestres mòbils.
RTK	Sigla anglosaxona de l'expressió <i>Real-Time Kinematics</i> .
SSNG/GNSS	Sistema Satel·litari de Navegació Global / <i>Global Navigation Satellite System</i> .

1 Introducció

En els últims anys s'han desenvolupat els escàners làser terrestres mòbils (MTLS, de l'anglès: *Mobile Terrestrial Laser Scanners*). El desenvolupament de la tecnologia LiDAR (de l'anglès: *Light Detection and Ranging*) que s'ha produït en les darreres dècades ha fet possible l'obtenció de núvols de punts que permeten caracteritzar l'arquitectura dels arbres. Els sensors LiDAR es basen en una font làser emissora de polsos de llum que impacten en l'objecte d'estudi. A partir del temps que el pols de llum tarda a anar i retornar al sensor es pot calcular la distància en que està l'objecte (Rosell-Polo et al., 2017). Darrerament, diversos estudis han usat MTLS basats en sensors LiDAR 2D per caracteritzar arbres i cultius en entorns agraris (Walklate et al. 2002).

El Grup de Recerca en AgròTICa i Agricultura de Precisió (GRAP) de la Universitat de Lleida ha desenvolupat diversos escàners làser terrestres mòbils basats en els sensors Hokuyo UTM-30LX-EW i el sensor LiDAR Velodyne VLP-16. A més a més, el GRAP ha estudiat un sistema MTLS basat en el sensor Microsoft Kinect2, que podria ser una alternativa més econòmica.

Aquesta tecnologia de caracterització de la vegetació permetria quantificar els canvis en l'estructura dels arbres en diversos moments al llarg de la campanya i en un futur pròxim podria permetre una millor gestió dels recursos i de les operacions agrícoles (productes fitosanitaris, fertilització, reg, esporga, etc.), reduint els costos econòmics i ambientals (Rosell-Polo i Sanz, 2012). També podria permetre la detecció i classificació dels òrgans de l'arbre que poden ser d'interès per optimitzar operacions i estimar el rendiment (Auat et al., 2015). No obstant, encara hi ha necessitat d'estudiar a fons les aplicacions emergents que permet aquesta tècnica.

Per poder desenvolupar aquesta nova tecnologia de l'agròTICa és fonamental que l'error de mesura sigui mínim i sigui conegut i, per tant, cal desenvolupar metodologies per a validar-les.

2 Objectius

Els objectius d'aquest treball són:

- a) obtenir i validar un patró real i digital de referència mitjançant tècniques fotogramètriques
- b) desenvolupar una metodologia per a la validació de mesures obtingudes amb escàners làser terrestres mòbils (MTLS)
- c) determinar l'error de mesura de tres MTLS desenvolupats pel Grup de Recerca en AgròTICa i Agricultura de Precisió (GRAP) basats en el sensor LiDAR Hokuyo UTM-30LX-EW, el sensor LiDAR Velodyne VLP-16 i el sensor RGB-D Microsoft Kinect2
- d) determinar la resolució òptima d'escaneig
- e) definir el cost per hectàrea del servei d'escaneig de l'estructura dels fruiters d'una plantació amb MTLS.

3 Materials i mètodes

3.1 Generació del patró digital de referència

Per tal de poder determinar l'error que cometien els sistemes d'escaneig es va decidir crear un patró real a partir del qual generar un model o patró digital de referència. El patró real va ser un pomer (*Malus domestica* Bork.) plantat amb un sistema de formació amb eix central. El patró real va ser tallat l'any 2016. El GRAP va preparar l'arbre model defoliant-lo i fixant-lo sobre un palet que disposa de rodes. La Figura 1 mostra el model d'arbre, defoliat i fixat al palet.

Aplicant tècniques estèreo-fotogramètriques d'alta definició al patró real es va obtenir un patró digital de referència en 3D. El patró digital de referència generat amb fotogrametria també va ser realitzat l'any 2016 pel GRAP.

Quan es realitza un model fotogramètric s'acostuma a deixar l'objecte sòlid fixe a la part central i la càmera es va movent al seu voltant realitzant les fotografies. Posteriorment, s'utilitza un programa informàtic que busca coincidències entre les parelles de fotografies i calcula la posició de cada píxel de l'escena en un espai tridimensional. D'aquesta manera quan es realitza la unió dels punts en comú de totes les fotografies l'escena queda perfectament reconstruïda. No obstant, per tal de controlar les condicions d'il·luminació es va decidir fer les fotografies a l'interior d'un edifici i, per falta d'espai, es va deixar fixa la càmera i es va anar fent girar l'arbre sobre ell mateix (Figura 2). Així doncs, per a que el programa d'unió de les fotografies en 3D funcionés correctament, es va eliminar el fons de l'escena manualment amb el programari PhotoShop. Es va realitzar una fotografia cada 10° de rotació de l'arbre. A la part de darrere i de sota l'arbre s'hi va instal·lar un fons de plàstic de color blanc per tal de facilitar la eliminació del fons de l'escena en les fotografies.



Figura 1. Model d'arbre defoliat i fixat al palet.

Les fotografies es van realitzar amb una càmera Reflex Cànon EOS-60D equipada amb un objectiu de 50 mm. Es va decidir treballar sense zoom per tal de facilitar la unió dels punts en comú de les diverses fotografies. El programa fotogramètric que es va utilitzar va ser el PhotoScan V.1.1.6. (Agisoft). Les fotografies es van realitzar amb el diafragma f/22, és a dir, considerablement tancat per tal de tenir una bona profunditat de camp (enfocament de tota l'escena). La velocitat d'obturació varià entre 2,5 i 3,2 s. Es varià la velocitat d'obturació ja que quan es van començar a realitzar les fotografies al matí el reflex era més directe i després va ser menor al migdia. Ambdues velocitats permeteren que es veiessin de manera òptima tots els detalls de l'arbre, fins i tot les branques més fines, i capturar els colors de manera correcta. El balanç de blancs va ser de 6000 K i es va treballar amb una sensibilitat del sensor ISO100.



Figura 2. Escena amb el model de referència durant la presa de fotografies.

La càmera es va situar a 4,02 m del centre de l'arbre. Primer es va estacionar la càmera a 0,4 m a l'esquerra de l'eix de l'arbre (A) i posteriorment es va estacionar a 0,4 m a la dreta de l'arbre (B). Es van utilitzar dues posicions, dreta i esquerra, per dos motius: per generar estereoscòpia i perquè l'amplada de l'arbre no cabia en uns sola foto a una distància de 4,02 m. A continuació la Figura 3 mostra l'esquema de la situació.

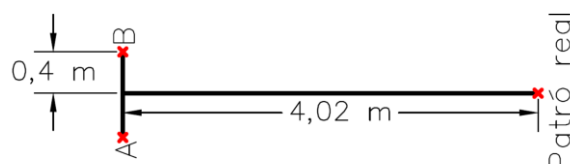


Figura 3. Esquema de la situació de la presa de fotografies.

Es realitzaren les fotografies a 4 nivells d'alçada (2,45 m, 1,89 m, 1,33 m i 0,77 m), tant des del costat dret com des del costat esquerre. El total de fotografies realitzades

fa ser 288, corresponents a 36 fotos per cada alçada (cada 10° de rotació de l'arbre) i per dos punts d'estacionament (A i B). La Figura 4 mostra la realització de les fotografies de la part superior de l'arbre.



Figura 4. Realització de les fotografies de la part superior de l'arbre.

Un cop es va eliminar el fons blanc de totes les fotografies, es va utilitzar el programa Photoscan per a unir-les i es va generar el model de l'arbre en 3D. Per tal que el programa funcionés millor, les fotografies es van unir per nivells d'alçada. És a dir, primer es va fer la unió de les imatges d'una mateixa alçada i posteriorment es va realitzar la unió de les quatre alçades. La Figura 5 mostra la unió de les fotografies d'una mateixa alçada.

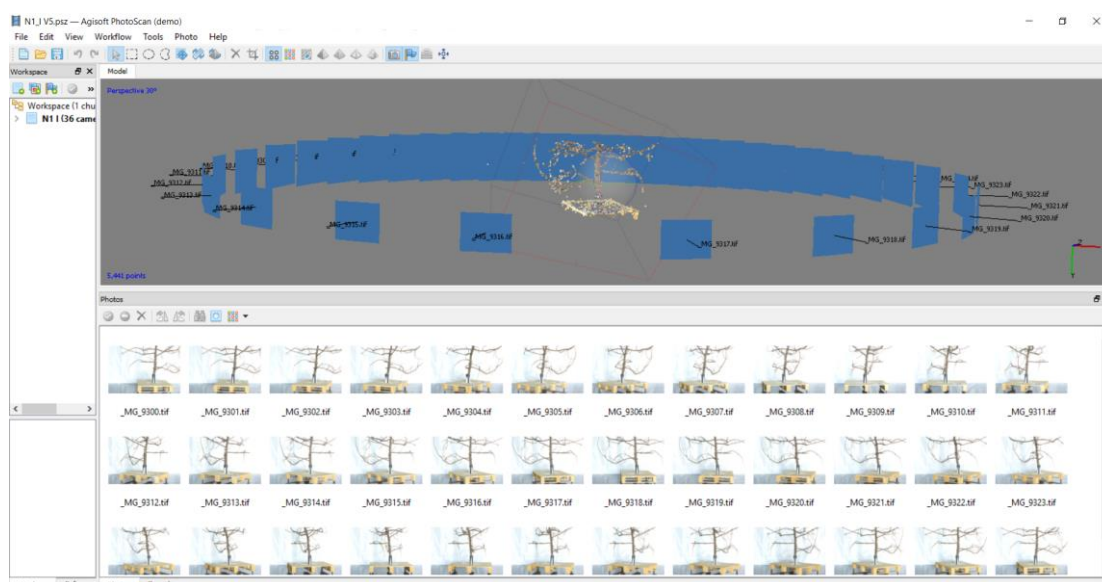


Figura 5. Unió de les imatges realitzades a 0,77 m.

El programari Agisoft PhotoScan és un software que crea models d'imatge de qualitat en 3D a partir de fotografies. Aquest programa està basat en la tecnologia de reconstrucció 3D multi-view, opera amb imatges arbitràries i presenta bons resultats tan quan les fotografies estan realitzades en ambients amb condicions d'il·luminació controlades com quan es realitzen en ambients no controlats. Per tal de poder realitzar la reconstrucció cal que com a mínim l'objecte estigui visualitzat amb dues fotografies, les imatges es poden prendre des de qualsevol posició. L'alineació de les imatges i la generació del model 3D estan automatitzats.

Quan es crea el model 3D, el programa no coneix la distància en la que s'han realitzat les imatges i aleshores el model 3D de l'arbre té unes dimensions incorrectes. Per solucionar aquest problema s'escala el model obtingut. Per a realitzar l'escalat, es va mesurar amb cinta mètrica sobre l'arbre real la distància que hi havia entre 11 punts (Figura 6). Els punts es van seleccionar per a que estiguessin distribuïts de manera que es mesuressin distàncies en totes les direccions. El fet de disposar de distàncies mesurades per totes les parts de l'arbre va permetre que l'escalat fos el més aproximat possible a la realitat i que l'arbre no quedés deformat.

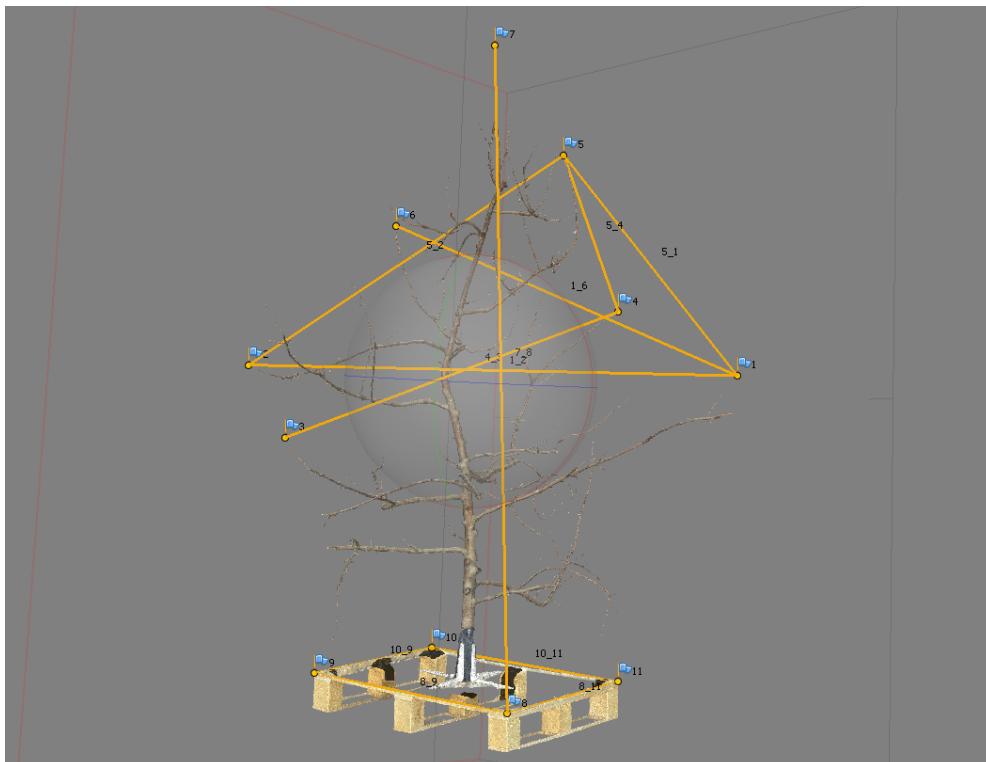


Figura 6. Punts entre els que es va mesurar la distància amb cinta mètrica per a realitzar l'escalat.

El resultat obtingut va ser un model 3D del patró real en forma de núvol de punts 3D amb coordenades relatives. El núvol obtingut està compost per 49.751.573 punts. Donat que el nombre de punts obtingut era molt elevat i per aconseguir un patró digital més manejable, es va fer un submostreig aleatori del núvol fins a deixar-lo amb un 1 milió de punts. Cada punt, a més de les seves coordenades relatives x, y i z, incloïa informació RGB per tal d'assignar-li el corresponent color de visualització. La Figura 7 mostra el patró digital de referència obtingut. El patró real (arbre físic) està situat al Laboratori de Mecanització Agrària de l'ETSEA.

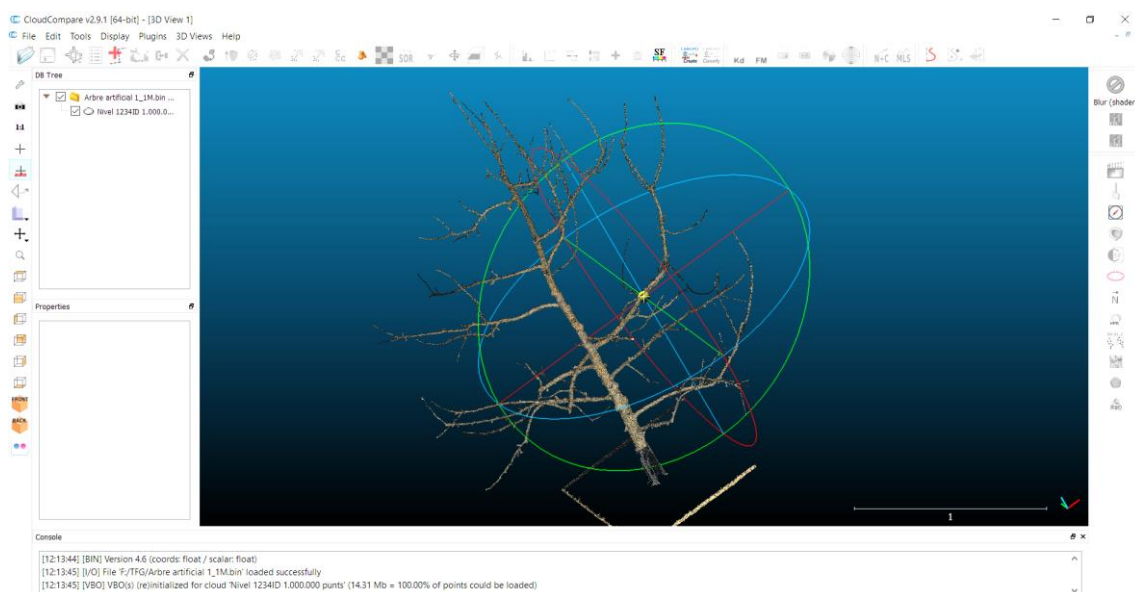


Figura 7. Núvol de punts 3D del patró real obtingut per fotogrametria que servirà de patró digital de referència.

A l'apartat 4.2 es veurà que aquest patró digital original generat l'any 2016 no és vàlid i que es repetirà el mateix anàlisi fotogramètric d'alta definició l'any 2018. Aquest nou núvol de punts s'anomena patró digital 18.

3.2 Validació del patró digital de referència

La validació del patró digital es va realitzar a partir de la comparació de diversos diàmetres i longituds mesurades al patró real i al patró digital. L'obtenció de les mesures del patró digital es va realitzar amb el programari CloudCompare v2.9.1.

CloudCompare és un programari lliure dissenyat per l'enginyer francès Daniel Girardeau-Montaut, i tal com el seu nom indica està pensat per comprar núvols de punts i poder-los estudiar. Una de les seves funcions principals és realitzar mesures

sobre les diferències entre dos núvols de punts. D'aquesta manera és possible determinar, per exemple, els canvis en el creixement de vegetals. És molt habitual que els núvols de punts processats al CloudCompare s'hagin obtingut realitzant un escaneig amb làser. CloudCompare proporciona un conjunt d'eines bàsiques per a l'edició manual i la representació de núvols de punts 3D, malles triangulars i imatges calibrades. També ofereix diversos algorismes que permeten realitzar operacions més complexes com crear projeccions, computació de distàncies, computació d'estadístiques, segmentacions i mesura de característiques geomètriques.

Per poder realitzar l'estudi estadístic que permetés acceptar o rebutjar que el patró digital fos vàlid, calia seleccionar una sèrie de punts fàcilment identificables tant al patró real com al digital. Un cop identificats els punts es va realitzar la mesura dels diàmetres i de les distàncies. Tant en el patró real com en el patró digital es realitzaren 4 mesures de diàmetre en cada punt seleccionat (Figura 8) i es realitzà la mitjana dels 4 valors per tal de proporcionar un valor de diàmetre el més fidel possible a la realitat. Al patró real es realitzaren les mesures amb peu de rei i al patró digital s'utilitzà l'eina de mesura del programa CloudCompare. Per obtenir el diàmetre amb CloudCompare primer es seleccionà una llesca fina de la secció de l'arbre que es volia mesurar i posteriorment s'obté el diàmetre amb l'eina de mesura que ofereix el software (Figura 8).

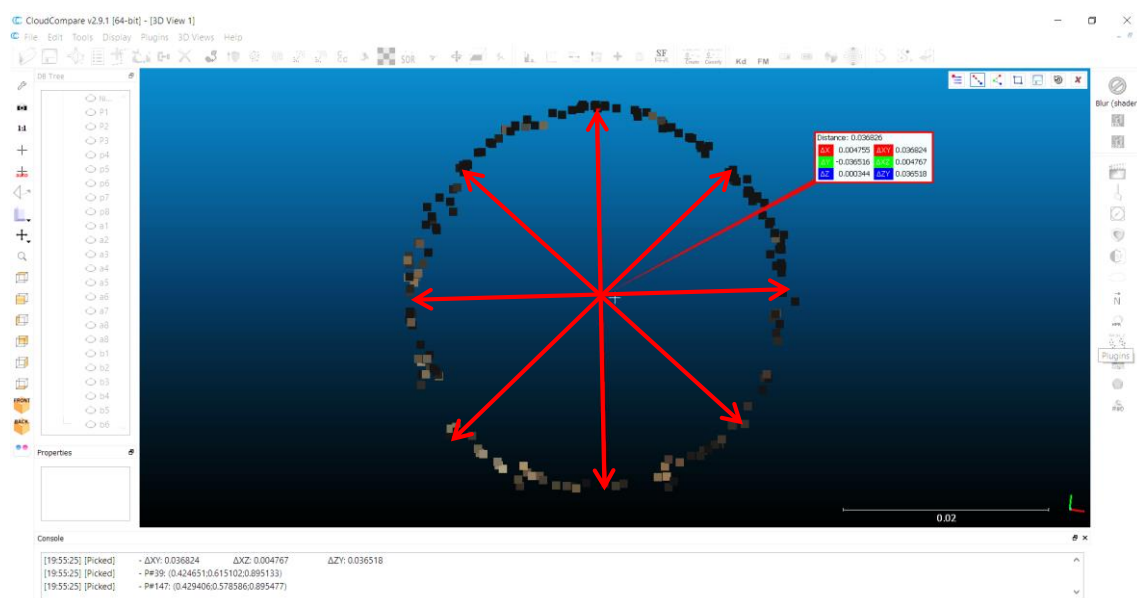


Figura 8. Mesura dels diàmetres utilitzats per a calcular el diàmetre mitjà d'una de les llesques obtinguda en un dels punts mesurats.

A l'hora de realitzar la selecció de punts es va tenir en compte que estiguessin distribuïts de manera equilibrada per a tot el rang de diàmetres present als patrons.

Per tal d'assegurar la presència de totes les classes diamètriques es van seleccionar diverses branques i es van mesurar els diàmetres des de la base fins a l'extrem (veure Figura 9). Es va seguir el mateix procediment per realitzar la mesura dels diàmetres del tronc de l'arbre.

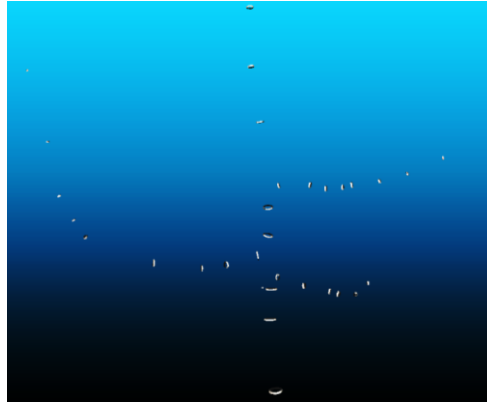


Figura 9. Llesques de punts corresponents als XX punts de mesura de diàmetres realitzades al patró digital amb CloudCompare.

En relació a l'anàlisi estadística, primer es realitzà un contrast de diferència de mitjanes aparellades, amb la variància desconeguda i per a una quantitat de mostres petita.

Es plantejà una prova d'hipòtesi en que la hipòtesi nul·la indicava que no hi ha diferència entre la mitjana dels diàmetres del patró real i la mitjana dels diàmetres del patró digital. La hipòtesi alternativa indicava que hi ha diferències entre les mitjanes. Posteriorment es realitza una modelització de l'error relatiu i de l'error absolut.

$$H_0: \mu_d = \mu_1 - \mu_2 = \Delta = 0$$

$$H_1: \mu_d > \Delta; \mu_d < \Delta; \mu_d \neq \Delta$$

D'altra banda, per a la validació de les longituds, es va realitzar un contrast de diferència de dades aparellades. Es va plantejar una prova d'hipòtesi en que la hipòtesi nul·la indica que no hi ha diferència entre les longituds reals i les longituds del patró. La hipòtesi alternativa indica que hi ha diferències. Posteriorment es va realitzar un ajust d'un model de regressió lineal simple de longituds del patró digital en funció de les longituds mesurades al patró real.

3.3 Sistemes d'escaneig de la vegetació MTLS

Els sistemes d'escaneig desenvolupats pel GRAP són escàners làser terrestre mòbils (MTLS). Cadascun d'aquests sistemes està formats per:

- Sensor làser que escaneja la vegetació
- Subsistema de posicionament per a georeferenciar la posició del sensor
- Subsistema d'adquisició
- Plataforma automotriu que desplaça els sensors

El GRAP disposa de tres sensors làser i, per tant, pot utilitzar tres MTLS diferents. Els tres MTLS comparteixen la plataforma automotriu, el sistema de posicionament i el sistema d'adquisició, tot i que el programari utilitzat és diferent. A continuació descriurem els diferents elements del sistema d'escaneig.

Els sensors làser utilitzats són el sensor LiDAR *Hokuyo UTM-30LX-EW*, el sensor LiDAR *Velodyne VLP-16* i el sensor *Microsoft Kinect 2*.

3.3.1 Sensor LiDAR Hokuyo UTM-30LX-EW

El sensor LiDAR *Hokuyo UTM-30LX-EW* (veure Figura 10), fabricat per Hokuyo (Osaka, Japó), és un sensor de làser radial que escaneja en dos dimensions capaç de mesurar les distàncies de 1080 punts en un rang angular de 270° (de -135° a 135°) amb una freqüència de 40 Hz. Aquest sensor té rang de mesura garantit de 30 m i un abast màxim de 60 m (Figura 11). Cada escaneig proporciona 1080 mesures contingudes en un pla vertical perpendicular a la direcció del recorregut del làser, generant més de 43.000 punts per segon.



Figura 10. Vista del sensor LiDAR Hokuyo UTM-30LX-EW muntat sobre el gimbal.

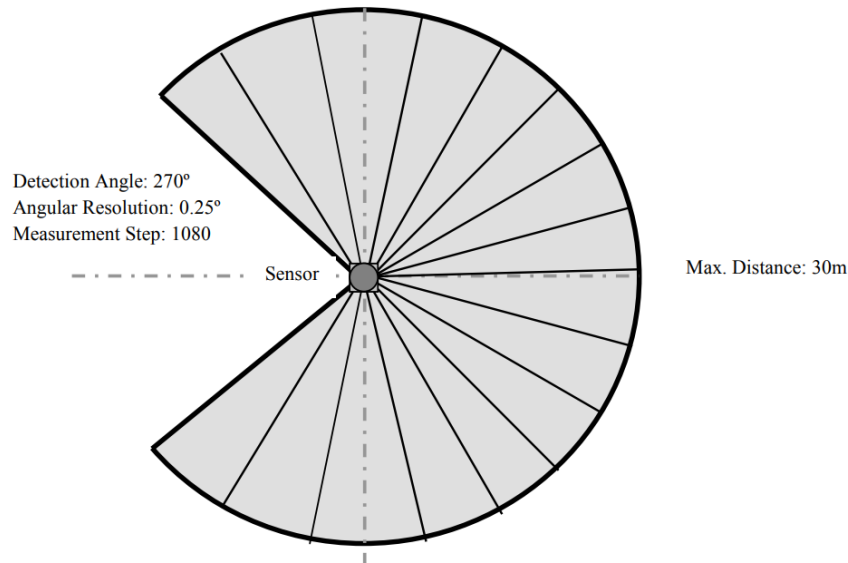


Figura 11. Diagrama de la zona d'escaneig del sensor Hokuyo.

Aquest sensor té capacitat de retorn múltiple i proporciona tres mesures de distància corresponents a l'impacte parcial sobre diferents objectes d'un mateix pols emès pel làser. Tanmateix, aquesta característica no es fa anar en aquest projecte. Després de processar el senyal rebut, el sensor determina la distància a la que es troba l'objecte. Les mesures, que donen informació de la distància i angle del punt respecte el sensor, s'obtenen en coordenades polars, prenent el centre del sensor com a origen de coordenades.

El sensor va muntat sobre un gimbal, que és un dispositiu que incorpora un sensor inercial i dos motors pas a pas amb l'objectiu de mantenir el sensor anivellat enfront a inclinacions en els plans longitudinal (*pitch*) i transversal (*roll*).

El sensor es va acompanyar d'un RTK-GNSS (de l'anglès *Real-Time Kinematics Global Navigation Satellite System*) de manera que la posició del sensor quedava registrada 20 vegades per segon (Auat et al., 2015). D'aquesta manera es van anar superposant les llesques escanejades en 2D i es va obtenir un núvol de punts en 3D.

L'adquisició de les dades es va realitzar amb un programari propi dissenyat pel GRAP realitzat amb el llenguatge gràfic LabVIEW 2012. El programa es va executar en un ordinador portàtil industrial Getac V110. El programa adquiria les mesures del sensor Hokuyo i les coordenades obtingudes pel receptor GNSS-RTK.

El resultat va ser un arxiu de text (.txt) amb la següent estructura:

- Línia de text amb hora d'adquisició i coordenades de l'antena del receptor GNSS-RTK.

- Una matriu de 3 columnes corresponents a les distàncies al sensor del primer, el segon i el tercer retorn entre 0° i 270° , cada $0,25^{\circ}$.

Els arxius obtinguts es van processar amb un programari propi elaborat en Matlab per a georeferenciar cadascun dels punts escanejats. El resultat va ser un conjunt d'arxius amb 3 columnes on hi havia les coordenades absolutes X, Y i Z de cada punt.

3.3.2 Sensor LiDAR Velodyne VLP-16

El sensor LiDAR VLP-16 (Figura 12) és un sensor fabricat per Velodyne Inc. (EEUU), que realitza mesures en tres dimensions a una velocitat de fins a 20 Hz i que genera uns 300.000 punts per segon (Kannan, 2016). Aquest sensor té un rang angular de 360° i un camp de visió de 30° que s'aconsegueix amb 16 parells d'emissors-receptors làser. El seu rang de mesura és de 100 m.

Els 16 emissors que es disparen milers de vegades per segon de manera seqüencial permeten escanejar 16 plans diferents amb una obertura de 30° proporcionant un núvol de punts 3D en temps real (Kannan, 2016).

A part del càlcul de la distància basada en el temps de vol, el LiDAR VLP-16 proporciona l'angle de l'azimut, l'angle d'elevació i la reflectivitat de objecte interceptat amb una resolució de 256 bits (Kannan, 2016).



Figura 12. Vista del sensor LiDAR Velodyne VLP-16.

L'adquisició de les dades d'aquest sensor es va realitzar amb el programari Veloview, facilitat pel fabricant del sensor. El programa es va executar en un ordinador portàtil industrial Getac V110, que adquiria únicament les mesures del sensor. En un altre ordinador portàtil industrial Getac V200 es va enregistrar la trajectòria realitzada pel sensor a partir del sistema de posicionament GNSS-RTK. El resultat va ser un conjunt d'arxius. Per un costat es va generar un arxiu de text (.txt) amb les coordenades de la trajectòria de l'antena del receptor GNSS-RTK i, per un altre costat, es varen generar un conjunt d'arxius en format text (.csv) amb els diferents escanejors, que contenen la posició de cada punt (x, y, z) en relació al sensor, la intensitat del retorn i la identificació del feix de llum emissor (de l'1 al 16). Els arxius es van processar amb un

programari propi elaborat en Matlab per a georeferenciar cadascun dels punts obtingut. El resultat va ser un conjunt d'arxius amb 3 columnes on hi ha les coordenades x, y i z de cada punt.

3.3.3 Sensor Microsoft Kinect 2

El sensor *Microsoft Kinect2* (Figura 13) és un dels sensors més populars i representatius de les càmeres de baix cost que s'han desenvolupat recentment (Rosell-Polo et al., 2017) i que dona informació de color, distància i infraroig per a cada punt del núvol (Auat et al., 2015; Bertheloot et al., 2012; Nguyen et al., 2016). Per tant, el sensor Kinect2 es pot considerar un sensor RGB-D, o depth càmera, que dona les mateixes dades que una càmera digital més la distància a la que es troba cada píxel. El sensor Kinect2 va ser dissenyat com a complement de la consola videojocs Xbox, i per tant està pensat per a jugar en espais interiors. Per aquest motiu la majoria dels desenvolupaments tecnològics del sensor Kinect2 s'han centrat en entorns interiors (Khoshelham i Elberink., 2012; Fox et al., 2012). Per tal d'obtenir mesures vàlides es recomana utilitzar el sensor Kinect2 quan la llum ambiental és inferior a aproximadament 300 lux (Rosell-Polo, comunicació personal).

Rosell-Polo et al. (2017) van presentar la combinació del sensor *Kinect v2* (K2-MTLS) amb el sistema de posicionament GNSS i amb el sistema de correcció diferencial a temps real (RTK) com a un sistema MTLS de baix cost.

El sensor Kinect2 en combinació amb RTK-GNSS permet la captura dels punts en diferents instants i la seva georeferenciació, d'aquesta manera s'obté un núvol de punts en 3D. El sensor té un camp de visió de 70° en horitzontal i 60° en vertical, que permet capturar 512 píxels horitzontals per 424 píxels verticals. Rosell-Polo et al. (2017) consideren que per minimitzar l'error quan es realitza una caracterització geomètrica s'ha d'ajustar l'emissió i captura de fotogrames a una única columna, que correspon a la central.



Figura 13. Vista del sensor Microsoft Kinect2

L'adquisició de les dades d'aquest sensor es va realitzar amb un programari propi dissenyat pel GRAP, elaborat amb el llenguatge C#. Aquest programa es va executar en un ordinador portàtil convencional que adquiria les mesures del sensor.

El resultat va ser un arxiu de text (.txt) amb la següent estructura:

- Línia de text amb una sentència NMEA que conté les coordenades de l'antena del receptor GNSS-RTK projectades en UTM 31T ETRS89 i l'hora d'adquisició.
- Una matriu amb les coordenades de cada punt relatives al sensor (x, y, z), els paràmetres R, G i B i la intensitat d'infraroig del retorn.

Els arxius es van processar amb un programari propi per a georeferenciar cadascun dels punts obtinguts. El resultat va ser un conjunt d'arxius amb 3 columnes on hi ha les coordenades x, y i z de cada punt.

3.3.4 Receptor GNSS-RTK

Es va utilitzar un receptor GNSS-RTK *Leica GPS 1200+*, de la casa Leica (Wetzlar, Alemanya). L'antena d'aquest receptor es capaç de rebre senyal dels satèl·lits del Sistema Satel·litari de Navegació Global (GNSS). Aquest receptor pot treballar amb el sistema de correcció diferencial en moviment a temps real RTK, que aconsegueix que l'error de posicionament sigui centimètric. La Figura 14 mostra el receptor *Leica GX1230* connectat a l'antena *AX1203+GNSS* que actuava com a base RTK.



Figura 14. Base RTK formada pel receptor Leica GX1230 connectat a l'antena AX1203+GNSS situada a un punt de coordenades conegudes a l'edifici 4.

3.3.5 Plataforma automotriu

La plataforma automotriu és un vehicle híbrid autònom amb un ampli rang de velocitats ajustables en funció de la resolució d'escaneig que es desitja obtenir. La plataforma mòbil utilitzada per a transportar el sistema d'escaneig en 3D va ser dissenyada pel grup de recerca GRAP de la UdL.

En l'assaig realitzat, la plataforma automotriu va ser alimentada per corrent trifàsic directament de la xarxa. La Figura 15 mostra la plataforma automotriu. S'observa que al màstil de la plataforma automotriu s'hi va fixar l'antena GNSS i un dels sensors amb els que es va realitzar l'escaneig. La velocitat d'avançament de la plataforma automotriu es pot ajustar. La velocitat d'avanç de la plataforma es regula modificant la freqüència (Hz) dels dos variadors de freqüència (n'hi ha un per a cada roda) de la plataforma automotriu.



Figura 15. Plataforma automotriu dissenyada pel grup de recerca GRAP de la UdL base dels tres MTLS comparats.

3.4 Assaig de validació dels MTLS

3.4.1 Descripció de l'assaig

Per a determinar l'error comès pels MTLS basats en els tres sensors descrits es va realitzar un assaig de camp que va consistir en escanejar el patró real amb els diferents MTLS i comparar els resultats obtinguts amb el patró digital de referència.

L'assaig es va realitzar darrera de l'edifici 4 de l'ETSEA, en una zona plana, amb suficient espai per poder realitzar l'escaneig a la distància adequada i visible des del punt A, del qual es coneixen les coordenades. L'escaneig s'havia de realitzar sense vent i el sensor Kinect2 s'havia d'utilitzar amb una il·luminació ambiental inferior a 300 lux, per tant es realitzà de nit. La Figura 16 mostra l'escena de la zona d'escaneig. A l'escena s'hi observa la plataforma automotriu, que està situada aproximadament a 2,5 m de la base de l'arbre, i l'estació total (situada sobre el punt A) utilitzada per a georeferenciar el patró real, situat al centre de la zona d'escaneig.



Figura 16. Escena de l'assaig de comparació de MTLS.

Per realitzar l'escaneig es requereix el següent material:

- Luxòmetre
- Ordinador Getac (x2)
- GNSS-RTK
- Estació total
- Plataforma automotriu
- Anemòmetre Lechler

- Sensor Hokuyo + suport + gimbal
- Sensor Velodyne + suport
- Sensor Kinect + suport
- Bateries de cotxe per alimentar els sensors
- Focus per a treballa de nit (x2)

3.4.2 Georeferenciació del patró de referència

El núvol de punts del patró digital obtingut tenia coordenades relatives i, per tant, no estava georeferenciat. En canvi, els núvols de punts obtinguts amb els diferents MTLS sí que estava georeferenciats. Per a poder realitzar la comparació de cada núvol de punts obtingut amb cada un dels tres MTLS i calcular els errors, s'havien de superposar els núvols MTLS amb el núvol del patró digital de referència. Per tal que la superposició fos el més exacta possible, abans de realitzar el primer escaneig MTLS es va deixar fix el patró real i es va georeferenciar amb coordenades absolutes.

Per georeferenciar l'arbre es va col·locar cinta adhesiva reflectant en els 11 punts que havien servit anteriorment per escalar el patró digital. La Figura 17 mostra la cinta adhesiva reflectant, de color gris. La georeferenciació de l'arbre es realitzà mesurant amb l'estació total, estacionada sobre el punt A, de coordenades absolutes conegudes, els angles azimuthals, els angles zenitals i la distància a cada un dels 11 punts.



Figura 17. Element reflectant (de color gris) utilitzat per mesurar distàncies i angles amb l'estació total.

Amb la mesura de la distància i els angles es van obtenir les coordenades relatives de cada punt de l'arbre respecte l'estació total i, per tant, respecte del punt A. Sumant les coordenades del punt conegut i les coordenades relatives a l'estació total es van obtenir les coordenades absolutes dels 11 punts del patró real.

Posteriorment es varen introduir les coordenades absolutes obtingudes de cada punt al núvol de punts del patró digital. En aquest procés es va realitzar un segon escalat del patró digital, que no va modificar gairebé cap distància ja que el núvol de punts ja tenia les dimensions correctes.

3.4.3 Protocol de l'assaig

A continuació s'exposa el protocol que es va seguir per a fer l'assaig de comparació.

1. Estacionar la base RTK al punt de coordenades conegudes (Taula 1) del terrat de l'edifici 4 (Figura 18).

Taula 1. Posició del punt de coordenades conegudes del terrat de l'edifici 4 de l'ETSEA.

UTM 31T / ETRS89	
X (m)	299763,818
Y (m)	4611430,818
Z (m)	202,546



Figura 18. Estacionament de la base RTK sobre un punt de coordenades conegudes del terrat de l'edifici 4 de l'ETSEA.

2. Comprovar les coordenades conegudes del punt A (Taula 2), on s'estacionà l'estació total, amb el rover RTK (Figura 19).

Taula 2. Coordenades del punt A.

UTM 31T / ETRS89	
X (m)	299704,176
Y (m)	4611419,920
Z (m)	189,433



Figura 19. Comprovació de les coordenades del punt A.

3. Col·locar l'arbre a l'espai on es realitzarà l'escaneig (Figura 20). Un cop instal·lat l'arbre no s'havia de modificar la seva posició fins que es finalitzi l'assaig.



Figura 20. Col·locació de l'arbre en el punt on es vol realitzar l'escaneig.

4. Estacionar l'estació total sobre el punt A, de coordenades conegudes (Figura 21).



Figura 21. Estacionament de l'estació total sobre el punt A (fletxa vermella).

5. Marcar 7 punts de l'arbre i els 4 extrems del palet amb un element reflectant (Figura 22).

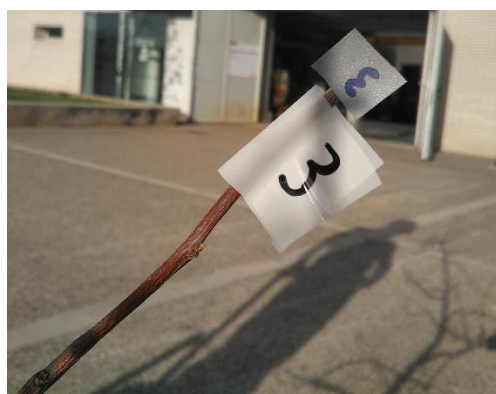


Figura 22. Elements reflectants situats a branques de l'arbre i al palet.

6. Mesurar amb l'estació total, estacionada en el punt A, els angles azimuthals, els angles zenitals i la distància a cada una dels punts marcats amb l'element reflectant.
7. Realitzar l'escaneig amb el sensor Hokuyo (Figura 23).



Figura 23. Escaneig MTLS basat en el sensor Hokuyo.

- I. Mesurar el vent.
- II. Muntar el sensor a 1,5 m del terra.
- III. Mesurar els offsets antena-sensor (Figura 24).



Figura 24. Mesura dels offsets del sensor Hokuyo.

- a) Δx (perpendicular al sentit d'avanç)
 - b) Δy (sentit d'avanç)
 - c) Δz
- IV. Escaneig a diferents resolucions.

Es va realitzar l'escaneig a dos velocitats diferents i es van realitzar dos repeticions per a cada una de les velocitats.

- a) 0,5 km/h \rightarrow 0,35 cm/scan (funcionament plataforma a 9,23 Hz).
- b) 2,0 km/h \rightarrow 1,40 cm/scan (funcionament plataforma a 35,77 Hz).

8. Realitzar l'escaneig amb el sensor Velodyne (Figura 25).



Figura 25. Escaneig MTLs basat en el sensor Velodyne.

- I. Mesurar el vent.
- II. Muntar el sensor a 1,5 m del terra.
- III. Mesurar els offsets antena-sensor.
 - a) Δx (perpendicular al sentit d'avanç)
 - b) Δy (sentit d'avanç)
 - c) Δz
- IV. Escaneig a diferents resolucions.

Es va realitzar l'escaneig a dos velocitats diferents i es van realitzar dos repeticions per a cada una de les velocitats.

- a) 0,5 km/h (funcionament plataforma a 9,23 Hz).
- b) 2,0 km/h (funcionament plataforma a 35,77 Hz).

9. Realitzar l'escaneig amb el sensor Kinect2 (Figura 26).



Figura 26. Escaneig MTLS basat en el sensor Kinect2.

- I. Mesurar el vent.
- II. Muntar el sensor a 1,5 m del terra.
- III. Mesurar els offsets antena-sensor.
 - a) Δx (perpendicular al sentit d'avanç)
 - b) Δy (sentit d'avanç)
 - c) Δz
- IV. Escaneig a diferents resolucions.

Es va realitzar l'escaneig a dos velocitats diferents i es va realitzar dos repeticions per a cada una de les velocitats.

- a) 0,5 km/h (funcionament plataforma a 9,23 Hz).
- b) 2,0 km/h (funcionament plataforma a 35,77 Hz).

3.5 Metodologia de validació dels MTLS

Per a determinar l'error de mesura dels diferents MTLS es van comparar els núvols de punts obtinguts en cada escaneig amb el núvol de punts del patró digital de referència. Per a fer-ho es va utilitzar l'eina "*Cloud-to-Cloud Distance computation*" del programa CloudCompare. Aquesta eina permet calcular la distància punt a punt entre dos núvols. Aquest càlcul es realitzà d'acord amb el mètode del veí més pròxim, és a dir,

per a cada punt del núvol comparat, CloudCompare busca el punt més proper del núvol de referència i calcula la distància euclidiana entre ells (Figura 27).

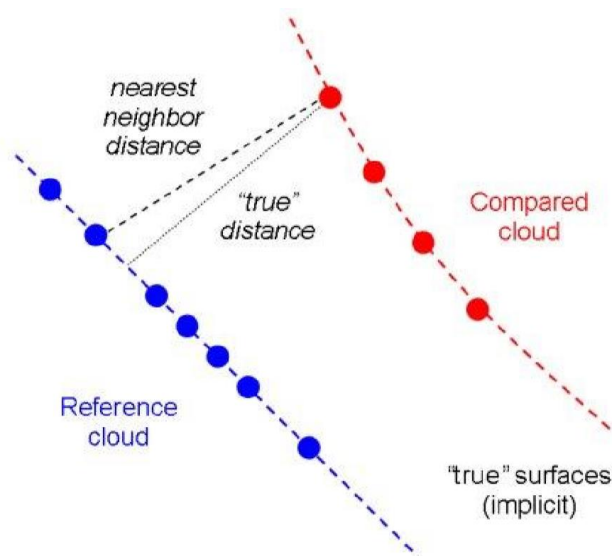


Figura 27. Càlcul de la distància entre dos núvols de punts amb el mètode del punt veí més pròxim (CloudCompare).

D'acord amb les indicacions del programa CloudCompare, cal tenir en compte que quan es realitza aquest càlcul, si el punt del núvol que es compara no té un punt del núvol de referència proper, donarà un error elevat encara que estigui situat correctament. Tanmateix, donat que el número de punts del núvol del patró digital de referència era molt elevat (1 milió de punts) el resultat que s'obtingué al realitzar el càlcul de diferències entre núvols es considera robust, ja que sempre hi haurà un punt del núvol de referència proper al punt del núvol que s'està comparant. El resultat va ser que a cadascun dels núvols comparats es va crear un camp escalar nou que indicava l'error per a cadascun dels punts del núvol. Aquest escalar va poder representar amb una escala de colors i un histograma que indiquen l'error de cada punt (Figura 28). Els resultats es van exportar a fitxers de text (.txt) que per cada punt inclouen les coordenades absolutes (X, Y i Z), l'error absolut i l'error descompost en les direccions X, Y i Z.

Es van validar els núvols de punts de l'MTLS basat en el sensor Hokuyo, els del sensor Velodyne i els del sensor Kinect2. Les validacions dels núvols de punts de l'MTLS basat en els 3 sensors es va realitzar escanejant a velocitat mitja (0,5 km/h) i alta (2 km/h).

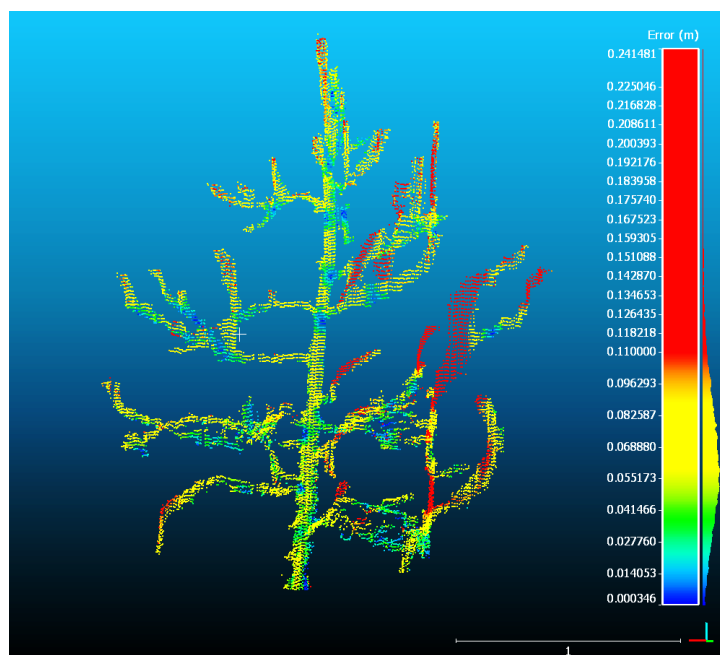


Figura 28. Visualització dels resultats que proporciona l'eina "Cloud-to-Cloud Distance computation".

A continuació es va aplicar estadística descriptiva als resultats de l'error absolut i de l'error descompost (X, Y i Z) de cada núvol de punts. Posteriorment es va realitzar un histograma per a cada núvol de punts. Per tal de poder comparar de manera visual tots els sistemes d'escaneig, es van representar els resultats amb diagrama de caixa, que dona informació dels valors màxim i mínim, dels quartils, de la mediana, de l'existència de valors atípics i de la simetria de la distribució.

Finalment es va realitzar la prova de separació de mitjanes de Tukey-Kramer, amb un nivell de significació de 0,05, que serveix per a decidir si les mostres d'errors comparades presenten diferències estadísticament significatives o no. Es va decidir usar aquesta prova ja que és àmpliament utilitzada a la bibliografia relacionada amb aquesta temàtica i no és una prova ni massa estricta ni massa conservadora a l'hora de realitzar separacions.

3.6 Estudi econòmic

L'objecte de l'estudi econòmic és definir el cost del servei d'escaneig de l'arquitectura dels fruiters d'una plantació per hectàrea amb MTLS basats en els sensors LiDAR Hokuyo UTM-30LX-EW, LiDAR Velodyne VLP-16 i Microsoft Kinect2. Es disposa del

cost de compra i de la velocitat d'escaneig dels sensors LiDAR Hokuyo UTM-30LX-EW, LiDAR Velodyne VLP-16 i Microsoft Kinect2.

El cost de l'adquisició de cada sistema MTLs es distribueix al llarg del període d'amortització del material. Es considera que la vida útil del material informàtic és de 12 anys. No obstant, es considera que aquesta tecnologia caurà en obsolescència en uns 8-10 anys, ja que s'espera que apareixen noves eines per realitzar aquesta tasca de manera més eficient i de més qualitat. Per aquest motiu, es realitza un anàlisi d'inversió tenint en compte únicament les despeses, és a dir, sense tenir en compte els ingressos, per un període de 8 anys. Es considera que amb un sistema MTLs es té una capacitat d'escaneig de 1760 hores anuals. Es considera que les finques tenen una amplada de carrer de 4 m. Es considera que la taxa de descompte és del 5 %.

Els costos fixos estan determinats pel cost dels sensors, de l'ordinador i del GNSS-RTK. Els costos variables venen determinats pel nombre d'hectàrees que s'escanejaran cada any, de la resolució d'escaneig i del cost horari del servei de passada del sistema MTLs. El cost total de realitzar l'escaneig és la suma dels costos variables i dels costos fixos. Els costos variables són de 35 €/h i inclouen el lloguer del vehicle tot terreny on va fixat el sistema MTLs i el tècnic. El cost fixe del sistema MTLs basat en el sensor Hokuyo és de 13.685 € (

Taula 3), el cost fixe del sistema MTLs basat en el sensor Velodyne és de 15.204 € (Taula 4) i el cost fixe del sistema MTLs basat en el sensor Hokuyo2 és de 8.023 € (Taula 5). Cal destacar que aquest cost correspon a l'obtenció dels núvols de punts dels arbres de la finca sense processar. Un cop obtinguts hi ha una segona fase de postprocessat dels núvols de punts. El cost de la fase de postprocessat no es valora en aquest estudi econòmic.

Taula 3. Costos fixos del sistema MTLs basat en el sensor Hokuyo.

Concepte	Cost (€)
LiDAR Hokuyo UTM-30LX-EW	4.246
Leica GNSS1200RTK	7.083
Getac V110	2.356
Total	13.685

Taula 4. Costos fixes del sistema MTLs basat en el sensor Velodyne.

Concepte	Cost (€)
LiDAR Velodyne VLP-16	3.238
Leica GNSS1200RTK	7.083
Getac V110	2.356
Getac V200	2.527
Total	15.204

Taula 5. Costos fixes del sistema MTLs basat en el sensor Kinect 2.

Concepte	Cost (€)
Microsoft kinect2	140
Leica GNSS1200RTK	7083
Ordinador portàtil convencional	800
Total	8023

4 Resultats i discussió

4.1 Validació del patró digital de referència

Per a validar el patró es van comparar tant per als diàmetres com les longituds del patró real i del patró digital.

a) Validació dels diàmetres

La Taula 6 mostra el resultat de l'anàlisi de dades aparellades entre els diàmetres del patró real i els diàmetres del patró digital.

Taula 6. Resultats del contrast de diferència de mitjanes.

Mitjana diàmetre patró digital (mm)	20,54
Mitjana diàmetre patró real (mm)	19,47
Diferència de mitjanes (mm)	1,08
Error estàndard (mm)	0,33
Extrem superior de l'IC al 95%	1,75
Extrem inferior de l'IC al 95%	0,40
N	29
Coeficient de correlació	0,998
Raó t	3,242
Graus de llibertat	28
Prob > t	0,0031

Donat que la Prob > |t| és inferior a 5% no es pot acceptar la hipòtesi nul·la, és a dir, hi ha diferències significatives entre la mitjana del patró real i la mitjana del patró digital.

L'error relatiu produït en els diàmetres del patró és del 5,5%. És a dir, el patró digital sobreestima un 5,5% els diàmetres.

$$\varepsilon_r = \frac{1,0762}{19,1728} = +0,055$$

La Figura 29 mostra la modelització de l'error relatiu en funció del diàmetre real.

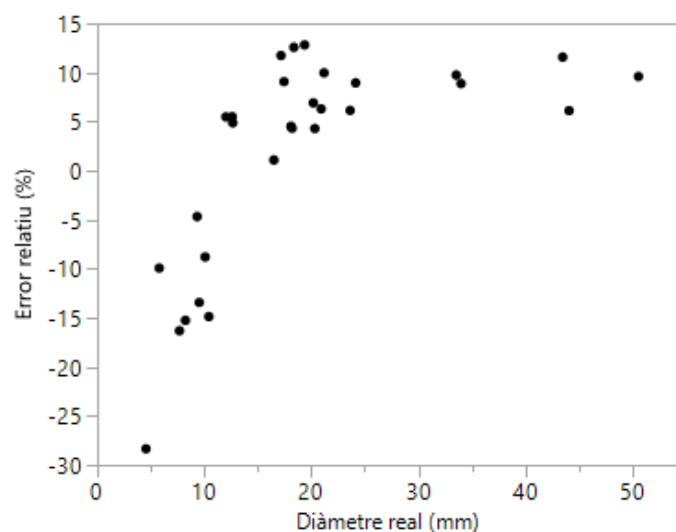


Figura 29. Modelització de l'error relatiu del patró digital en funció del diàmetre real.

S'observa que l'error relatiu de mesura del patró digital augmenta de forma considerable entre els diàmetres inferiors a 15-20 mm, en aquest cas subestimant el diàmetre real de manera molt considerable. A partir 20-25 mm de diàmetre la tendència de l'error relatiu del patró és estabilitzar-se al voltant del 8 %.

La Figura 30 mostra l'error absolut del diàmetre del patró en funció del diàmetre real. Al gràfic es mostra l'ajust lineal i la mitjana. La Taula 7 mostra el resum de l'ajust lineal.

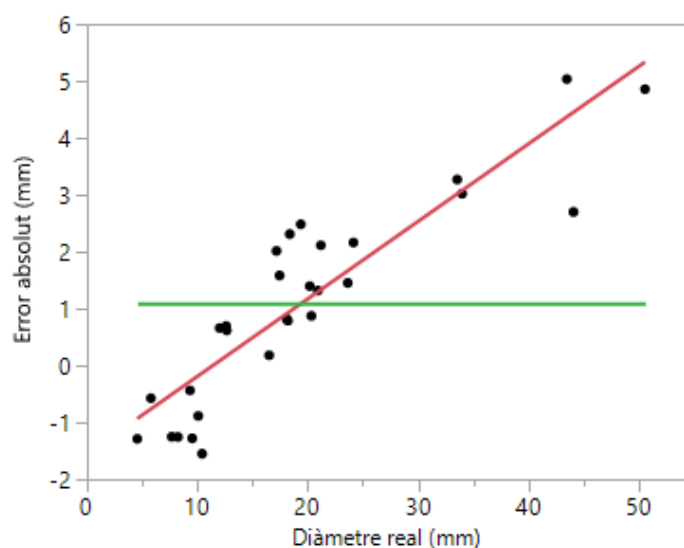


Figura 30. Error absolut del diàmetre del patró digital en funció del diàmetre real, es mostra l'ajust lineal (vermell) i la mitja (en verd).

Taula 7. Resum de l'ajust lineal.

R quadrat	0,802
R quadrat ajustat	0,795
Arrel de l'error quadràtic mig	0,809
Mitjanes de resposta	1,08
Observacions (o suma de pesos)	29

El coeficient de determinació, R^2 , mesura la qualitat de l'ajust. El coeficient de determinació R^2 s'interpreta com la raó entre la variància explicada pel model i la variància total. R^2 està comprés entre 0 i 1, i com més pròxim a 1 es situï millor és la qualitat de l'ajust. S'observa que el model lineal ajustat té un R^2 elevada, cosa que dona robustesa al model. La següent equació mostra com varia l'error absolut dels diàmetres del patró en funció del valor dels diàmetres reals.

$$\text{Error (mm)} = -1,594 + 0,137 \cdot \text{Diàmetre}_{\text{real}}$$

La Figura 30 mostra que l'error absolut del patró augmenta a mesura que augmenta el diàmetre real que es mesura. S'observa que els diàmetres inferiors a 10 mm estarien subestimats pel patró digital i els diàmetres majors a 10 mm estarien sobreestimats. Per aquest motiu es decideix realitzar un nou contrast de diferència de mitjanes aparellades discriminant entre els diàmetres superiors i inferiors a 10 mm.

La Figura 31 mostra com varia l'error absolut en funció del diàmetre. La Taula 8 mostra el resultat del contrast de dades aparellades entre els diàmetres reals i els diàmetres del patró.

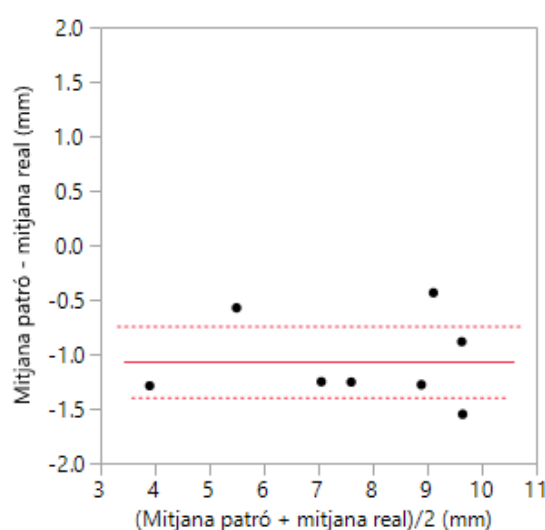


Figura 31. Representació de l'error absolut del patró digital en funció del diàmetre per als diàmetres inferiors a 10 mm.

Taula 8. Resultat del contrast de dades aparellades entre els diàmetres reals i els diàmetres del patró digital quan s'analitzen els diàmetres inferiors a 10 mm.

Mitjana diàmetre patró digital (mm)	7,13
Mitjana diàmetre atró real (mm)	8,24
Diferencia de mitjanes (mm)	-1,11
Error estàndard (mm)	0,155
Extrem superior de l'IC al 95%	-0,74
Extrem inferior de l'IC al 95%	-1,473
N	8
Coeficient de correlació	0,978
Raó t	-7,13607
Graus de llibertat	7
Prob > t	0,0002

S'observa que els diàmetres inferiors a 10 mm estan subestimats respecte els diàmetres reals. Els diàmetres del patró són 1,1 mm inferiors als reals.

L'error relatiu del patró és del -13 %.

$$\varepsilon_r = \frac{-1,10625}{8,900762} = -0,13$$

La Figura 32 mostra com varia l'error absolut en funció del diàmetre. La Taula 9 mostra el resultat de l'anàlisi de dades aparellades entre els diàmetres reals i els diàmetres del patró.

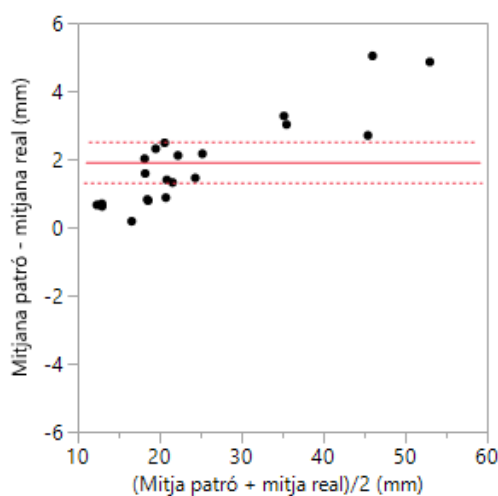


Figura 32. Representació de l'error absolut del patró digital en funció del diàmetre per als diàmetres superiors a 10 mm.

Taula 9. Resultat del contrast de dades aparellades entre els diàmetres reals i els diàmetres del patró digital quan s'analitzen els diàmetres superiors a 10 mm.

Mitjana diàmetre patró digital (mm)	25,66
Mitjana diàmetre patró real (mm)	23,75
Diferència de mitjanes (mm)	1,91
Error estàndard (mm)	0,29
Extrem superior de l'IC al 95%	2,51
Extrem inferior de l'IC al 95%	1,30
N	21
Coefficient de correlació	0,998
Raó t	6,56
Graus de llibertat	20
Prob > t	<,0001

S'observa que els diàmetres superiors a 10 mm estan sobreestimats respecte els diàmetres reals. Els diàmetres del patró són 1,9 mm superiors als reals. L'error relatiu del patró és del +8 %.

$$\varepsilon_r = \frac{1,908}{23,7514} = +0,08$$

b) Validació de les longituds

La Taula 10 mostra que es pot acceptar la hipòtesi nul·la, és a dir, que on hi ha diferències estadísticament significatives entre els valors del patró digital i el real en termes de longitud.

Taula 10. Resultat del contrast de dades aparellades entre les longituds reals i les longituds del patró digital.

Mitjana longitud patró digital (cm)	20,30
Mitjana longitud patró real (cm)	20,21
Diferència de mitjanes (cm)	0,09
Error estàndard (cm)	0,09
Extrem superior de l'IC al 95%	0,32
Extrem inferior de l'IC al 95%	-0,14
N	6
Coefficient de correlació	0,999
Raó t	1,008
Graus de llibertat	5
Prob > t	0,3593

La Figura 33 mostra la regressió lineal de les longituds del patró digital respecte les longituds predites.

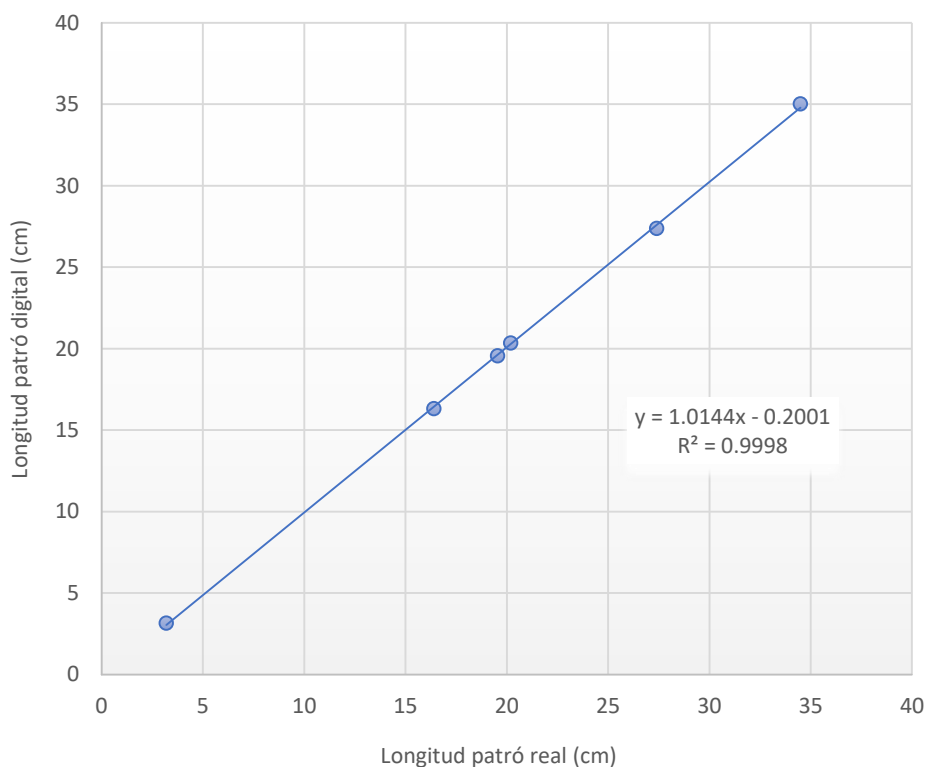


Figura 33. Regressió lineal de les longituds del patró digital respecte les longituds reals.

Aquesta regressió presenta una R^2 propera a 1, cosa que dona qualitat a l'ajust.

c) Discussió de la validació dels diàmetres i longituds

L'error relatiu en els diàmetres pot tenir diverses explicacions. La primera és que les mesures no es van prendre correctament, la segona és que les tècniques fotogramètriques o el procediment seguit no van permetre reconstruir el model real amb prou exactitud i la tercera és que durant el temps transcorregut des de que es va generar el patró digital l'any 2016 i la seva validació el model real ha pogut variar. Després de repetir algunes mesures, es va descartar la primera opció. En relació a la tercera opció, donat que les fotografies per generar el model fotogramètric es varen realitzar pocs dies després de talar l'arbre, podria haver passat que la fusta patís un procés de deshidratació que hagués modificat els diàmetres de tronc i branques.

Es van consultar dades de contracció radial total de diferents espècies arbòries, però no es va trobar la dels pomers. Així doncs, es van usar de referència espècies amb el mateix ordre de densitat que els pomers: *Alnus* té una contracció radial total del 4%,

Betula té una contracció radial total del 4,33% i *Fagus* té una contracció radial total del 5,66% (Gutierrez A. i Plaza F., 1967). Així doncs, s'observa que l'error relatiu del patró digital de -5,5% entra en l'ordre de magnitud de la contracció radial per deshidratació d'espècies de densitat de fusta semblant.

Donat que el patró digital subestimava els diàmetres al voltant del 6 %, es va decidir reescalar el patró digital per a crear un nou núvol de punts un 6 % més petit. Es van tornar a mesurar els diàmetres i es va aplicar de nou l'anàlisi estadística. El nou núvol de punts s'anomena patró digital reduït. Els resultats d'aquest patró reduït un 6% es mostren a l'apartat 4.1.1.

4.1.1 Validació del patró digital reduït

a) Validació dels diàmetres

La Taula 11 mostra el resultat de l'anàlisi de dades aparellades entre els diàmetres reals i els diàmetres del patró digital reduït.

Taula 11. Resultat del contrast de dades aparellades entre els diàmetres reals i els diàmetres del patró digital reduït.

Mitjana diàmetre patró digital reduït (mm)	23,76
Mitjana diàmetre patró real (mm)	23,72
Diferència de mitjanes (mm)	0,04
Error estàndard (mm)	0,14
Extrem superior de l'IC al 95%	0,33
Extrem inferior de l'IC al 95%	-0,25
N	17
Coefficient de correlació	0,999
Raó t	0,292
Graus de llibertat	16
Prob > t	0,7738

A la Taula 11 s'observa que es pot acceptar la hipòtesi nul·la, és a dir, no hi ha diferències significatives entre les mitjanes del patró digital i del real.

Així doncs, el patró digital reduït, creat reduint un 6% l'escala del patró digital original, representa de forma fidel els diàmetres.

La Figura 34 mostra l'error relatiu del diàmetre del patró digital reduït en funció de del diàmetre real.

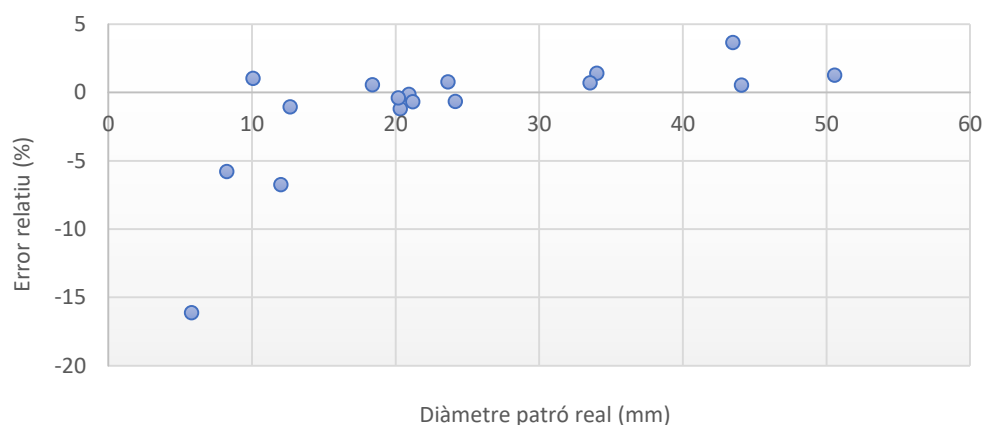


Figura 34. Error relatiu del diàmetre del patró digital reduït en funció del diàmetre real.

S'observa que per sobre del diàmetre real de 10-15 mm l'error relatiu del patró digital reduït varia entre el -1,5 % i el +4 %.

Per sota del diàmetre real de 10-15 mm l'error relatiu augmenta bruscament, en aquest cas subestimant de forma considerable el diàmetre del patró digital reduït.

Es realitza una regressió lineal entre el diàmetre del patró digital reduït un 6 % i el diàmetre real. El model lineal és el més simple per realitzar ajusts. Es considera que el diàmetre real és la variable explicativa i el diàmetre patró digital reduït és la variable resposta. La Figura 35 mostra la regressió lineal.

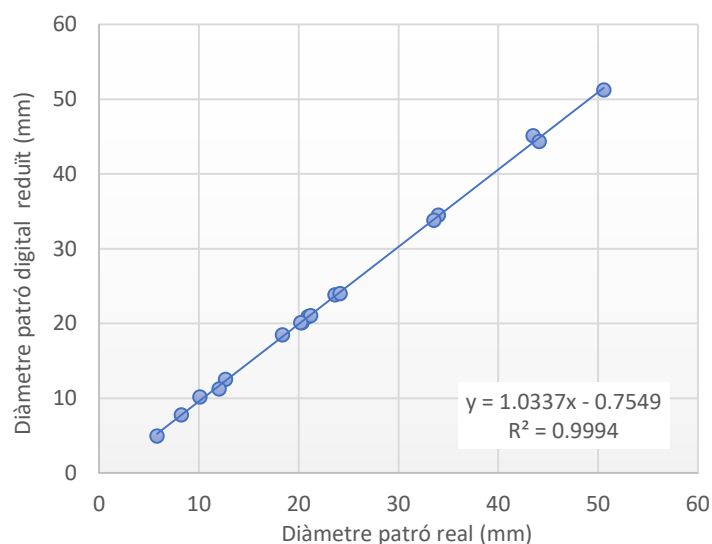


Figura 35. Regressió lineal del diàmetre del patró digital reduït en funció del diàmetre del patró real.

L'ajust entre el diàmetre patró digital reduït i el diàmetre del patró real presenta un R^2 de 0,999, així doncs, es pot afirmar que la qualitat de l'ajust és molt elevada.

b) Longituds

Taula 12 mostra el resultat de l'anàlisi de dades aparellades entre les longituds reals i les longituds del patró.

Taula 12. Resultat del contrast de dades aparellades entre les longituds del patró real i les longituds del patró digital reduït.

Mitjana longitud patró reduït (cm)	19,30
Mitjana longitud patró real (cm)	20,21
Diferència de mitjanes (cm)	-0,91
Error estàndard (cm)	0,16
Extrem superior de l'IC al 95%	-0,49
Extrem inferior d l'IC al 95%	-1,32
N	6
Coefficient de correlació	0,999
Raó t	-5,63
Graus de llibertat	5
Prob > t	0,0024

S'observa que no es pot acceptar la hipòtesi nul·la, és a dir, hi ha diferències significatives entre els valors del patró digital reduït i els valors del patró real.

La Figura 36 mostra la modelització de l'error relatiu de la longitud del patró digital reduït en funció de la longitud del patró real.

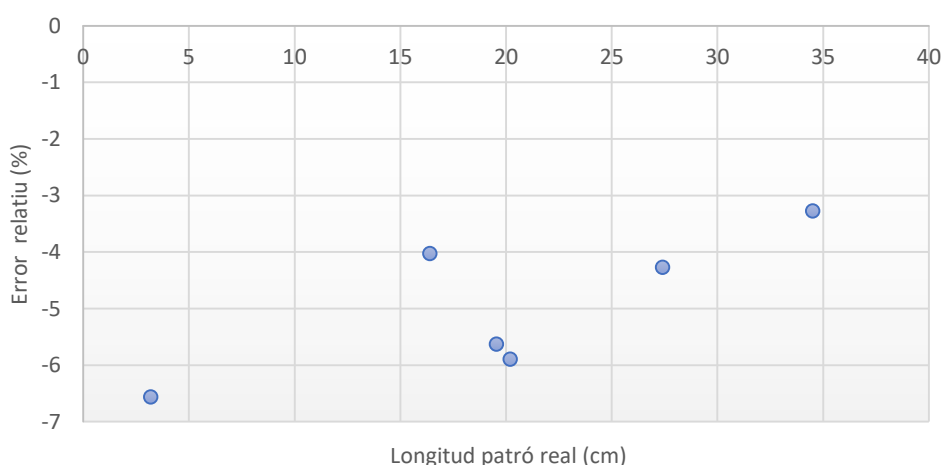


Figura 36. Error relatiu de les longituds del patró digital reduït en funció de la longitud del patró real.

S'observa que quan es redueix el patró digital original un 6% l'error relatiu de les longituds es situa entre el -3 i el -6,5 %.

c) Discussió de la validació de diàmetres i longituds

S'observa que el patró digital reduït representa de manera fidel a la realitat els diàmetres però comet un error en les longituds.

Cal destacar que abans de reduir el patró digital original les longituds no presentaven diferències significatives. Això s'explica ja que quant s'ha reduït el patró digital original s'ha contret un 6% en totes les direccions. En canvi, semblaria que la deshidratació del patró real ha provocat una contracció radial però no longitudinal. Per tant és lògic que el patró digital reduït passi a representar correctament els diàmetres i a representar de manera errònia les longituds.

Donat que el patró digital reduït no és vàlid es decideix realitzar un nou patró fotogramètric del mateix arbre. Aquesta reconstrucció fotogramètrica es realitzà a partir de fotografies preses l'any 2018, un cop el patró real ja estava completament deshidratat i es va realitzar d'acord amb el procediment descrit a l'apartat 3.1. El patró resultant es va anomenar patró digital 18 i els resultats de la seva validació es mostren a l'apartat 4.1.2.

4.1.2 Validació del patró digital 18

a) Validació dels diàmetres

La Taula 13 mostra el resultat de l'anàlisi de dades aparellades entre els diàmetres del patró real i els diàmetres del patró digital 18.

Taula 13. Resultat del contrast de dades aparellades dels diàmetres reals i els diàmetres del patró digital 18.

Mitjana patró digital 18(mm)	18,79
Mitjana patró real (mm)	18,94
Diferència de mitjanes (mm)	-0,16
Error estàndard (mm)	0,08
Extrem superior de l'IC al 95%	0,02
Extremo inferior de l'IC al 95%	-0,33
N	32
Coeficient de correlació	0,999
Raó t	-1,846
Graus de llibertat	31
Prob > t	0,0745

Donat que la Prob > |t| és superior a 5% s'accepta la hipòtesi nul·la, és a dir, s'accepta que no hi ha diferències significatives entre la mitjana dels diàmetres del patró digital 18 i la del patró real.

S'observa que per al conjunt dels diàmetres la mitjana de l'error absolut és de -0,15 mm. És a dir, la mitjana dels diàmetres reals és 0,15 mm inferior que la mitjana dels diàmetres del patró digital 18.

La Figura 37 mostra la modelització de l'error absolut dels diàmetres del patró digital 18 en funció dels diàmetres del patró real. Aquest gràfic també mostra una línia de tendència lineal i la mitjana de l'error absolut.

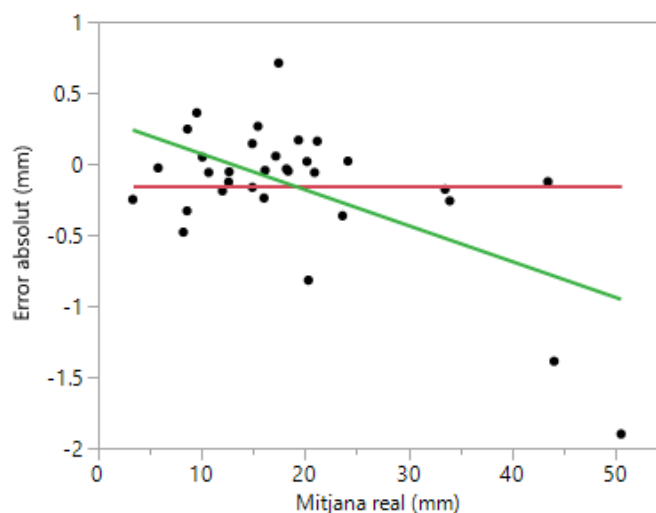


Figura 37. Error absolut dels diàmetres del patró digital 18 en funció dels diàmetres del patró real, es mostra l'ajust lineal (en verd) i la mitjana (en vermell).

En el gràfic de la Figura 37 s'observa que l'error absolut no té un patró de comportament clar. La Taula 14 mostra que la línia de tendència té un R^2 molt baix. No dona gaire robustesa al model, ja que només explica el 35% de la variabilitat de l'error. Que la R^2 sigui de 0,35 confirma que no hi ha una tendència clara i que l'error no segueix cap patró de comportament lineal.

Taula 14. Resum de l'ajust lineal.

R quadrat	0,35
R quadrat ajustat	0,33
Arrel de l'error quadràtic mig	0,39
N	32

La Figura 38 mostra l'error relatiu del diàmetre del patró digital 18 en funció del diàmetre del patró real.

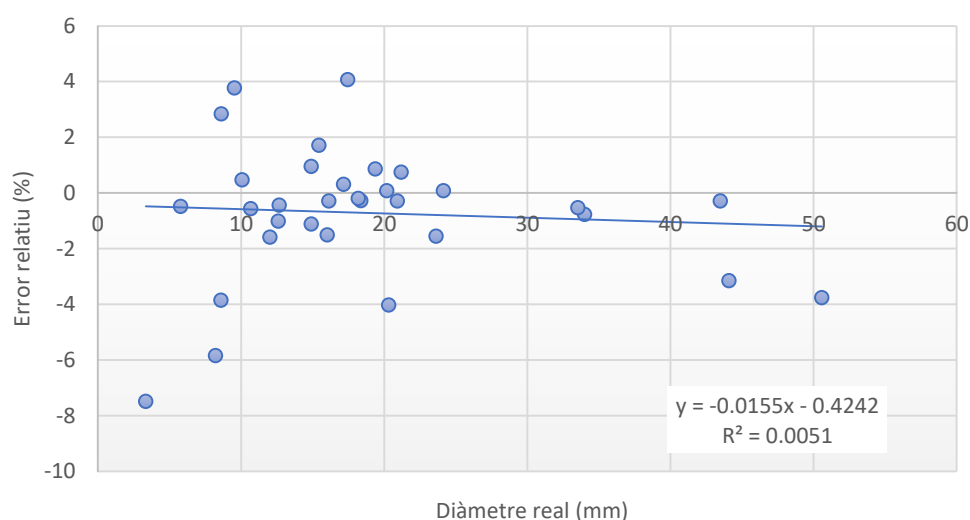


Figura 38. Error relatiu del diàmetre del patró digital 18 en funció del diàmetre del patró real.

S'observa que l'error relatiu és baix. La línia de tendència presenta un R^2 molt baix. Així doncs, l'error relatiu no mostra una línia de tendència. L'error relatiu del patró digital 18 no està estructurat.

b) Longituds

La Taula 15 mostra el resultat de l'anàlisi de dades aparellades entre les longituds del patró real i les longituds del patró digital 18.

Taula 15. Resultat del contrast de dades aparellades les longituds del patró real i les longituds del patró digital 18.

Mitjana patró digital 18 (mm)	1,413
Mitjana patró real (mm)	1,412
Diferència de mitjanes (mm)	0,001
Error estàndard (mm)	0,001
Extrem superior de l'IC al 95%	0,003
Extremo inferior de l'IC al 95%	-0,002
N	11
Coeficient de correlació	0,999
Raó t	0,7
Graus de llibertat	10
Prob > t	0,492

S'accepta que no hi ha diferències significatives entre la mitjana de les longituds del patró digital 18 i les del patró real.

La Figura 39 Mostra l'error relatiu de la longitud en funció de la longitud del patró real. S'observa que l'error relatiu és molt reduït i que en cap cas supera l'1 %.

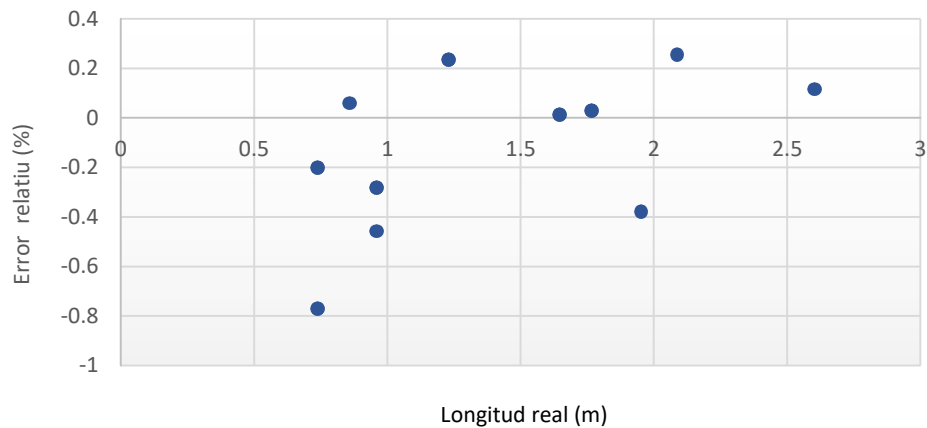


Figura 39. Error relatiu de la longitud en funció de la longitud del patró real.

La Figura 40 mostra la regressió lineal de la longitud del patró digital 18 en funció de la longitud del patró real.

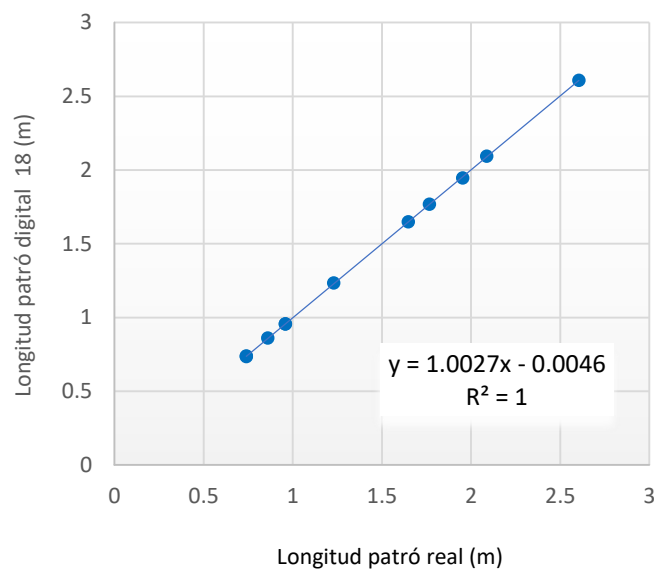


Figura 40. Regressió lineal de la longitud del patró digital 18 en funció de la longitud del patró real.

L'ajust de la longitud del patró digital 18 amb la longitud del patró real presenta un R^2 de 1, així doncs, es pot afirmar que la qualitat de l'ajust és molt elevada.

c) Discussió de la validació de diàmetres i longituds

S'observa que el patró digital 18 representa fidelment el patró real tant per als diàmetres com per a les longituds. Així doncs, s'utilitza el patró digital 18 per a comparar-los amb els núvols de punts generats amb els diferents MTLS.

4.1.3 Comparativa patró digital original i patró digital 18

La Figura 41 mostra els núvols de punts del patró digital original (blanc) i del patró digital 18 (vermell) superposats.

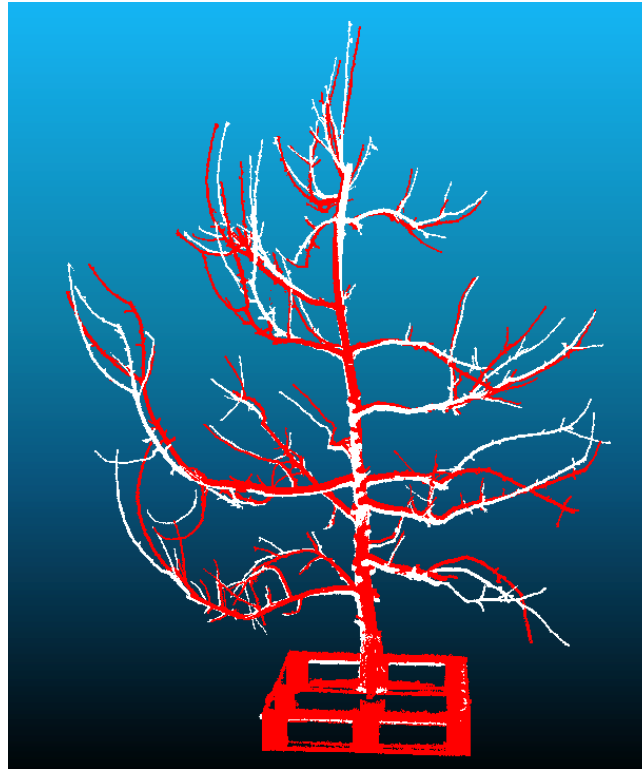


Figura 41. Patró digital original (blanc) i patró digital 18 (vermell).

En la Figura 41 s'observa que la posició de les branques ha canviat de manera important entre el 2016 i el 2018. El canvi es produeix tant en desplaçament lateral com en els angles que formen les branques i el tronc. Aquest canvis són probablement produïts per la deshidratació de la fusta.

Per tal de quantificar les diferències, s'ha utilitzat l'eina del programa CloudCompare *Cloud to cloud distances* descrita a l'apartat 3.5. A la Figura 42 es mostra el núvol de punts del patró digital original acolorit en funció de l'error absolut calculat en relació al patró digital 18. Al costat de l'escala de color també hi ha un histograma.

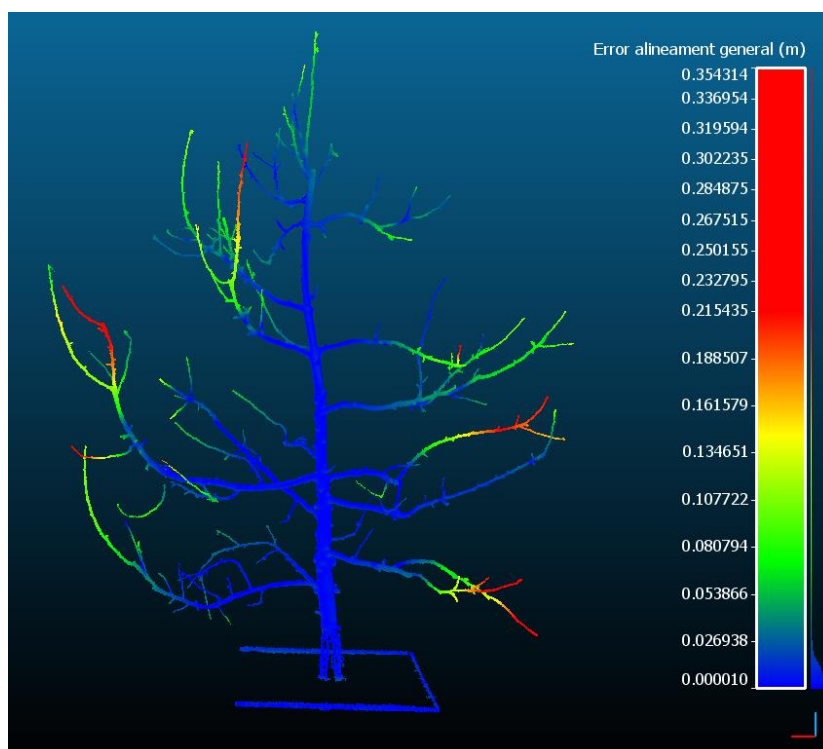


Figura 42. Patró digital original acolorit en funció de l'error en relació al patró digital 18.

El color blau representa variacions entre els dos núvols inferiors a 3 cm. S'observa que la major part del núvol de punts del patró digital original manté la posició de manera pràcticament idèntica que el núvol del patró digital 18. El color verd representa variacions d'entre 5 i 10 cm. S'observa que aquestes variacions es produeixen de la meitat de la branca fins als extrems. El color groc representa errors d'entre 10 i 15 cm. El color taronja representa errors entre 15 i 20 cm. Aquests dos tipus d'errors els trobem al darrer terç d'algunes de les branques. El color vermell representa errors situats entre 20 i 35 cm. Aquestes errors es troben a l'extrem d'unes poques branques.

4.2 Anàlisi dels errors dels MTLS

A continuació es realitza una anàlisi dels errors dels núvols de punts obtinguts amb els sistemes MTLS basats en els sensors LiDAR Hokuyo, Velodyne i Kinect2, escanejant a 0,5 km/h i a 2 km/h.

4.2.1 MTLS basat en el sensor Hokuyo UTM-30LX-EW

Els núvols de punts obtinguts amb dues velocitats diferents amb el sistema MTLS basat en el sensor Hokuyo es poden veure a la

Figura 43. El color representa l'error en relació al patró digital 18 (també representat), segons indica l'escala de color.

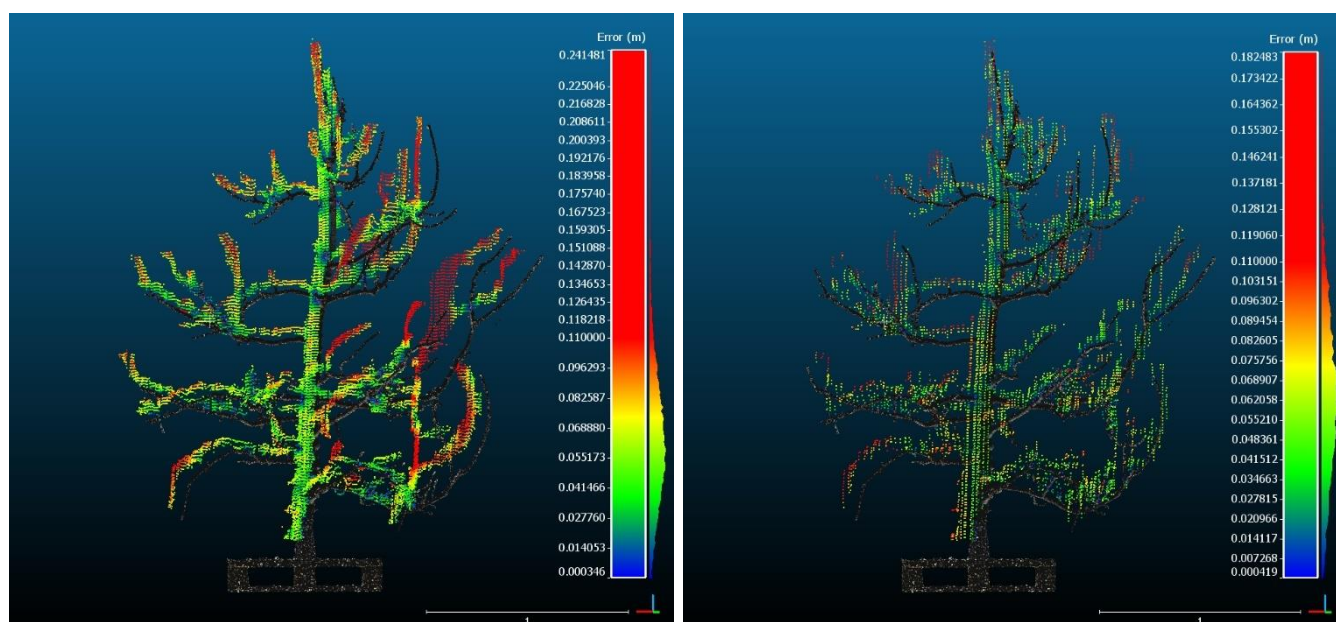


Figura 43. Núvols de punts obtingut amb el MTLs basat en el sensor Hokuyo escanejant a 0,5 km/h (esquerra) i escanejant a 2 km/h (dreta). El color dels punts indica la magnitud de l'error respecte del patró digital 18.

Figura 43 s'observa que el núvol que s'obté escanejant a 0,5 km/h té una densitat de punts superior que quan s'escaneja a 2 km/h. S'observa que el núvol més dens defineix millor el tronc i les branques de l'arbre. El núvol poc dens, obtingut escanejant a 2 km/h, té una menor definició de les branques, no obstant, situa les branques de manera correcta en l'espai. En el núvols escanejats a 0,5 km/h hi ha un error important a les branques de la zona dreta de la imatge, en aquestes branques el núvol de punts és considerablement més ample que la branca que representa i està allunyat de la situació real de la branca.

Es podria pensar que està causat per l'efecte *mixed píxels*. L'efecte *mixed pixels* es produeix quan una part del feix de llum del LiDAR impacta en un primer objecte i una altra part del mateix feix de llum impacta en un segon objecte proper, aleshores el sensor situa l'impacte entremig dels dos objectes donant la sensació que hi ha un volum sòlid entre ells. No obstant l'efecte *mixed píxels* es produeix en tota l'escena, és a dir, en tot el núvol de punts. No té molt sentit que aquest problema es produeixi només en una part concreta de l'arbre. O, en tot cas, no sembla que sigui l'única font d'error. No es coneix quines han estat les altres fonts de l'error. Durant l'escaneig

podria haver-se produït un problema amb la plataforma (canvi d'angle o en la velocitat d'avanç) o un problema amb el sistema de posicionament.

L'anàlisi estadística aplicada dels errors del núvol de punts de l'MTLS basat en el sensor Hokuyo escanejant a 0,5 km/h es pot veure a la Taula 16. Cal tenir present que l'error absolut no té en compte el signe de les distàncies mentre que les components X, Y i Z sí. Això fa que la mitjana de l'error de les components sigui més petita.

Taula 16. Anàlisi estadística dels errors absoluts i descompostos del núvol obtingut amb l'MTLS basat en el sensor Hokuyo escanejant a una velocitat d'avanç de 0,5 km/h.

	Error (m)	Error X (m)	Error Y (m)	Error Z (m)
Mitjana	0,066	0,034	0,018	0,017
Mediana	0,063	0,032	0,018	0,016
Moda	0,051	0,015	0,017	0,000
Desviació estàndard	0,034	0,041	0,032	0,032
Variància de la mostra	0,001	0,002	0,001	0,001
Curtosi	0,683	0,981	1,167	0,999
Coeficient d'asimetria	0,685	0,234	-0,322	0,002
Rang	0,241	0,354	0,353	0,300
Mínim	0,000	-0,155	-0,171	-0,109
Màxim	0,242	0,199	0,181	0,191
Punts (N)	18.741	18.741	18.741	18.741

L'anàlisi estadística aplicada al núvol de punts de l'MTLS basat en el sensor Hokuyo escanejant a 2 km/h es pot veure a la Taula 17.

Taula 17. Anàlisi estadística dels errors absoluts i descompostos del núvol obtingut amb l'MTLS basat en el sensor Hokuyo escanejant a una velocitat d'avanç de 2 km/h.

	Error (m)	Error X (m)	Error Y (m)	Error Z (m)
Mitjana	0,063	0,024	0,022	0,018
Mediana	0,062	0,023	0,022	0,015
Moda	0,034	0,024	0,027	0,038
Desviació estàndard	0,029	0,036	0,036	0,029
Variància de la mostra	0,001	0,001	0,001	0,001
Curtosi	-0,219	0,161	0,522	0,304
Coeficient d'asimetria	0,184	-0,066	-0,160	0,048
Rang	0,182	0,276	0,290	0,233
Mínim	0,000	-0,123	-0,132	-0,108
Màxim	0,182	0,153	0,157	0,125
Punts (N)	5.228	5.228	5.228	5.228

A la Taula 16 i la Taula 17 s'observa que la mitjana i la mediana tenen valors semblants. L'error absolut mitjà escanejant a 0,5 km/h i 2 km/h es situa al voltant de 6 cm. En l'escaneig realitzat a 2 km/h l'error és lleugerament inferior que en l'escaneig realitzat a 0,5 km/h. Això es pot explicar per la densitat de punts. Escanejant a 0,5 km/h s'obtenen 18.741 punts i escanejant a 2 km/h s'obtenen 5.228 punts. Aleshores es més probable que hi hagi punts que s'allunyen molt del patró en el cas del núvol d'alta densitat. No obstant, es considera que té més qualitat el núvol d'alta densitat de punts, tot i el major error, ja que representa millor l'arbre en totes les seves parts.

La curtosi passa de leptocúrtica quan s'escaneja a 0,5 km/h a platicúrtica quan s'escaneja a 2 km/h, aquest canvi tan brusc s'explica per la variació de la densitat de punts entre els dos núvols.

A continuació, la Figura 44 mostra els histogrames de l'error del sistema MTLS basat en el sensor Hokuyo escanejant a 0,5 km/h i a 2 km/h.

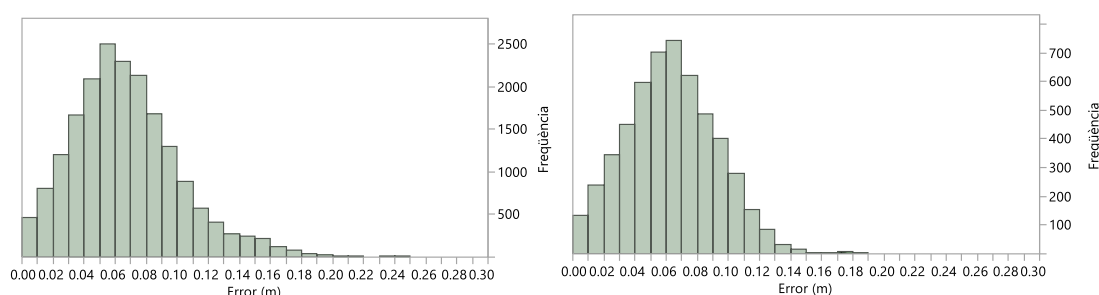


Figura 44. Histograma d'errors absoluts del sistema MTLS basat en el sensor Hokuyo escanejant a 0,5 km/h (esquerra) i escanejant a 2 km/h (dreta).

A la Figura 44 s'observa que el pic es situa en els dos casos al voltant de 6 cm, que coincideix amb la mitjana. Escanejant a 0,5 km/h la dispersió de l'error va de 0 a 24 cm i quan es realitza l'escaneig a 2 km/h la dispersió va de 0 a 18 cm. L'histograma no presenta errors en signe negatiu ja que es mesura l'error en valor absolut. S'observa que en els dos casos els histogrames son asimètrics cap a la dreta. S'observa que l'histograma té una freqüència elevada a la primera columna, és a dir, que hi ha bastants punts dels dos núvols que tenen un error proper a 0 cm. El núvol obtingut escanejant a 0,5 km/h presenta algun valor atípic que mostra un error al voltant dels 24 cm.

Cal tenir present que els errors calculats inclouen l'error propi del sensor Hokuyo UTM-30LX-EW, l'error del sistema d'estabilització o gimbal, l'error del sistema de

posicionament GNSS-RTK i l'error comès en la generació del núvol de punts tridimensional.

4.2.2 MTLS basat en el sensor Velodyne VLP-16

Els núvols de punts amb el color corresponent a l'error obtingut per al sistema MTLS basat en el sensor Velodyne es poden veure a la Figura 45.

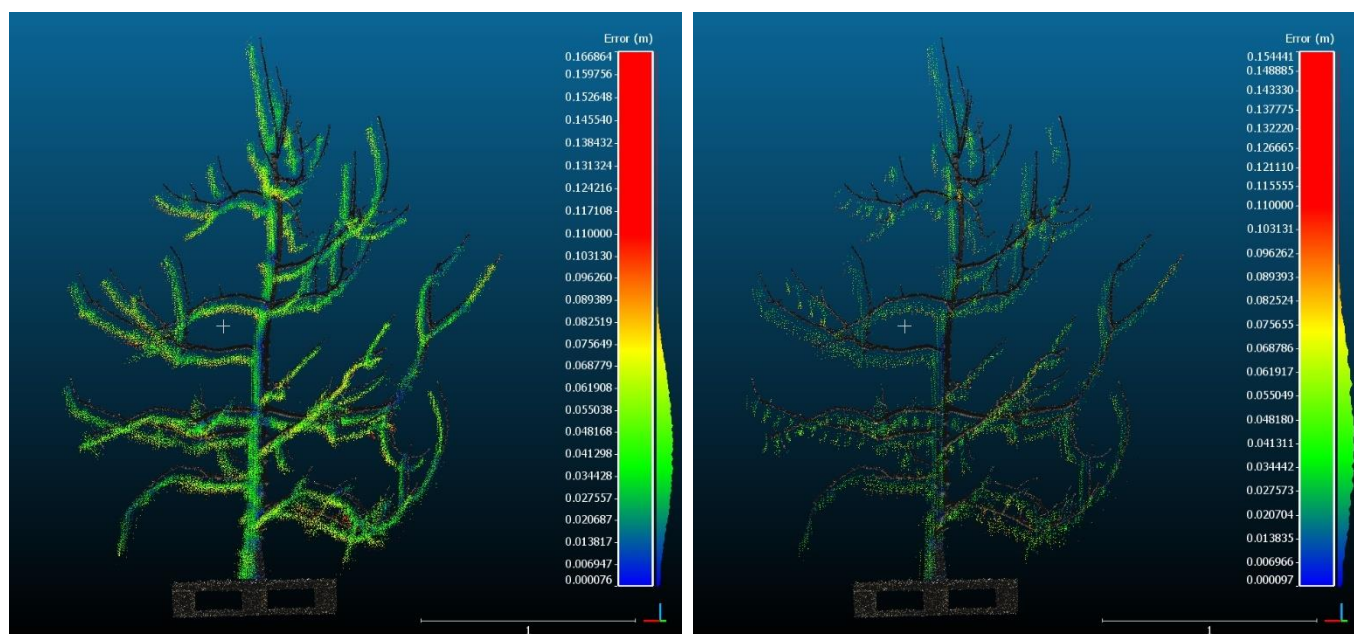


Figura 45. Núvols de punts obtingut amb el MTLS basat en el sensor Velodyne escanejant a 0,5 km/h (esquerra) i escanejant a 2 km/h (dreta). El color dels punts indica la magnitud de l'error respecte del patró digital 18.

La Figura 45 mostra que el núvol obtingut escanejant a 0,5 km/h té una alta densitat de punts i detecta totes les branques. Aquest núvol situa els punts lleugerament per sota dels del patró digital 18. Tot i això, es considera que el núvol de punts obtingut representa de forma molt correcta el patró real. S'observa que la majoria de l'error es situa al voltant dels 4-5 cm i que pràcticament no presenta errors superiors a 9 cm en cap part de l'arbre.

S'observa que el núvol obtingut escanejant a 2 km/h té una densitat de punts més baixa, en comparació amb el núvol obtingut escanejant a 0,5 km/h. Aquest núvol situa de manera correcta les branques i el tronc de l'arbre, no obstant, hi ha algunes branques de la part superior dreta de l'arbre que no estan ben escanejades i el núvol no presenta punts sobre parts considerablement grans d'alguna branca. Aquesta deficiència en el núvol és important, i no queda reflectida en l'anàlisi estadístic, ja que

al no haver-hi punts no realitza el càlcul de les diferències i l'error no queda computat. La majoria de l'error es situa al voltant de 4 cm, que és un error acceptable. Cal tenir present que els errors calculats inclouen l'error propi del sensor Velodyne VLP-16, l'error del sistema de posicionament GNSS-RTK, l'error degut a les inclinacions no compensades de la pròpia plataforma i l'error comès en la generació del núvol de punts tridimensional.

Amb la observació dels núvols de punts amb el color corresponent a la magnitud de l'error es determina que el núvol escanejant a 0,5 km/h té una major qualitat que el núvol obtingut escanejant a 2 km/h.

L'anàlisi estadística aplicada al núvol de punts de l'MTLS basat en el sensor Velodyne escanejant a 0,5 km/h es pot veure a la Taula 18.

Taula 18. Anàlisi estadística dels errors absoluts i descompostos del núvol obtingut amb l'MTLS basat en el sensor Velodyne escanejant a una velocitat d'avanç de 0,5 km/h.

	Error (m)	Error X (m)	Error Y (m)	Error Z (m)
Mitjana	0,043	0,018	0,010	-0,017
Mediana	0,043	0,018	0,010	-0,014
Moda	0,046	0,000	0,001	0,000
Desviació estàndard	0,021	0,023	0,023	0,024
Variància de la mostra	0,000	0,001	0,001	0,001
Curtosi	0,336	0,731	1,557	-0,277
Coeficient d'asimetria	0,334	-0,302	-0,405	-0,144
Rang	0,167	0,262	0,309	0,248
Mínim	0,000	-0,133	-0,158	-0,139
Màxim	0,167	0,129	0,152	0,109
Punts (N)	50.051	50.051	50.051	50.051

L'anàlisi estadística aplicada al núvol de punts de l'MTLS basat en el sensor Hokuyo escanejant a 2 km/h es pot veure a la Taula 19.

Taula 19. Anàlisi estadística dels errors absoluts i descompostos del núvol obtingut amb l'MTLS basat en el sensor Velodyne escanejant a una velocitat d'avanç de 2 km/h.

	Error (m)	Error X (m)	Error Y (m)	Error Z (m)
Mitjana	0,044	0,017	0,009	-0,018
Mediana	0,043	0,016	0,010	-0,015
Moda	0,042	0,022	0,008	0,000
Desviació estàndard	0,022	0,023	0,024	0,024
Variància de la mostra	0,000	0,001	0,001	0,001
Curtosi	0,148	0,835	1,910	-0,065
Coefficient d'asimetria	0,386	-0,146	-0,507	-0,202
Rang	0,154	0,231	0,286	0,230
Mínim	0,000	-0,108	-0,143	-0,130
Màxim	0,154	0,123	0,142	0,100
Compte	12.503	12.503	12.503	12.503

A la Taula 18 i a la Taula 19 s'observa que la mitjana i la mediana tenen valors semblants. L'error escanejant a 0,5 km/h i 2 km/h es situa al voltant de 4,3 i de 4,4 cm, respectivament. La densitat del núvol obtingut escanejant a 0,5 km/h és de 50.051 punts i la del núvol obtingut escanejant a 2 km/h és de 12.503 punts, considerablement inferior. El coeficient d'asimetria i la curtosi són similars en els dos casos, cosa que indica que les distribucions de l'error són similars.

A continuació la Figura 46 mostra els histogrames de l'error del sistema MTLS basat en el sensor Velodyne escanejant a 0,5 km/h i a 2 km/h.

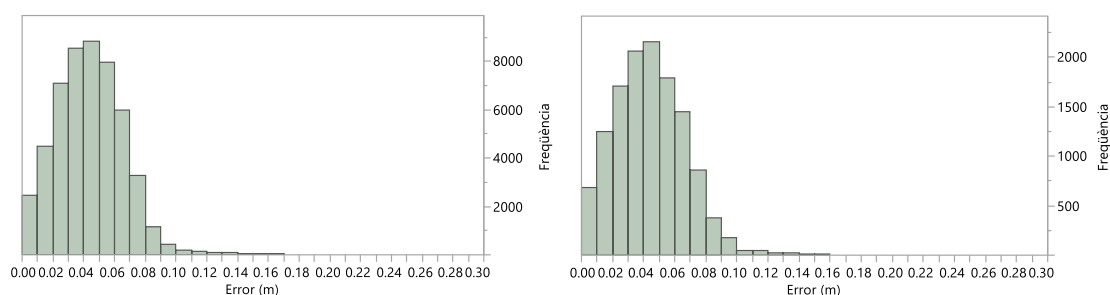


Figura 46. Histograma de l'error del sistema MTLS basat en el sensor Velodyne escanejant a 0,5 km/h (esquerra) i escanejant a 2 km/h (dreta).

S'observa que en els dos histogrames els pics es situen al voltant de 4 cm, que coincideix amb el valor de la mitjana. Quan l'escaneig es realitza a 0,5 km/h la dispersió va de 0 a 17 cm i quan es realitza a 2 km/h la dispersió es situa entre 0 i 16 cm. S'observa que a partir de 10 cm d'error la freqüència és molt baixa.

S'observa que l'anàlisi estadística aplicada als dos núvols dona valors similars i que faria complicat triar entre un dels dos núvols. No obstant, la densitat dels núvols i l'anàlisi visual indiquen que el núvol de punts obtingut escanejant a 0,5 km/h té una qualitat major que el núvol escanejat a 2 km/h.

4.2.3 MTLS basat en el sensor Microsoft Kinect 2

Els núvols de punts amb el color corresponent a l'error obtingut per al sistema MTLS basat en el sensor Kinect2 es poden veure a la Figura 47.

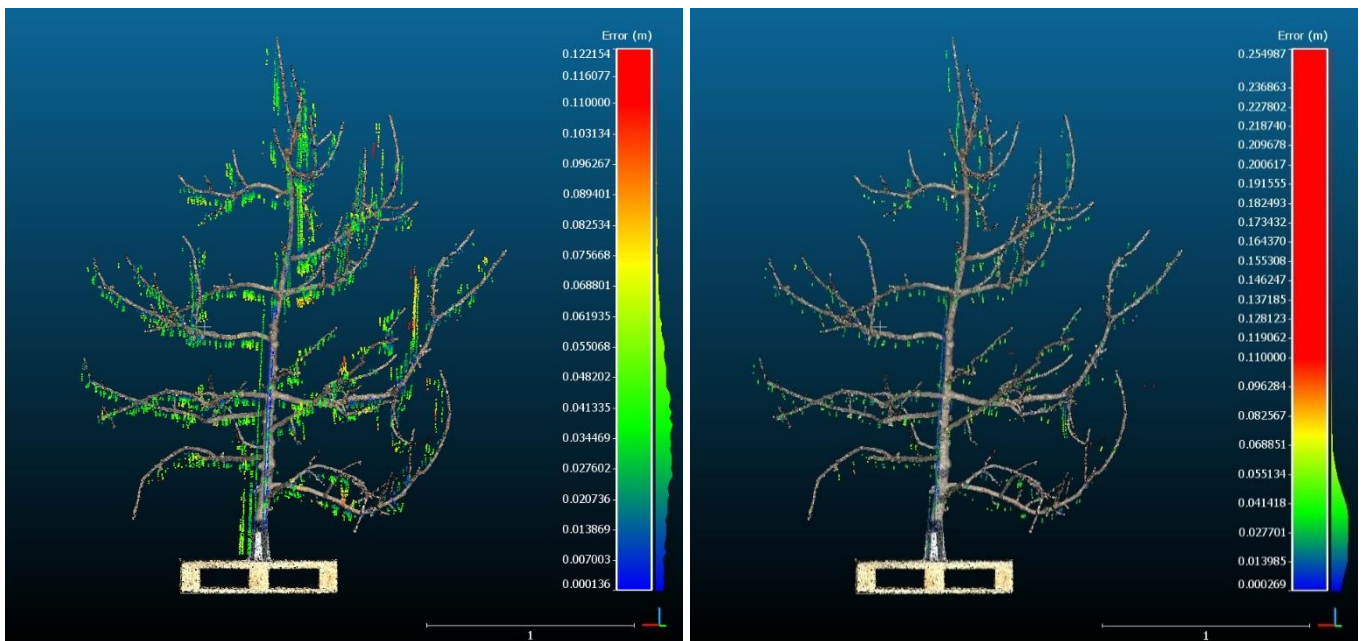


Figura 47. Núvols de punts obtingut amb el MTLS basat en el sensor Kinect2 escanejant a 0,5 km/h (esquerra) i escanejant a 2 km/h (dreta). El color dels punts indica la magnitud de l'error respecte del patró digital 18.

A la Figura 47 s'observa que les densitat dels núvols mesurats amb el sensor Kinect2 tenen una densitat de punts molt baixa en comparació amb els núvols obtinguts amb el sistema MTLS basats en els sensors Velodyne i Hokuyo.

El núvol obtingut escanejant a 0,5 km/h detecta majoritàriament de manera correcta on hi ha les branques. No obstant, hi ha una branca a la part dreta de l'arbre que la situa de manera incorrecta. El mateix problema i en la mateixa branca es produeix quan es realitza l'escaneig MTLS basant en el sensor Hokuyo. En l'apartat 4.2.1 s'havia apuntat a un possible error de funcionament de la plataforma automotriu o del sistema de posicionament. Donat que aquest error es repeteix un una mateixa zona concreta de forma reiterada hi ha d'haver algun altre problema que es desconeix.

Cal destacar que el núvol obtingut escanejant a 0,5 km/h presenta una densitat molt baixa i aleshores deixa trossos de branca sense punts, és a dir, que deixa sense representar parts de branques. Quan es deixa sense representar branques només es detecta amb un anàlisi visual, ja que aquest error no queda reflectit en l'anàlisi estadística.

El núvol obtingut escanejant a 2 km/h sembla que indica de manera correcta on es situen les branques. No obstant, presenta una densitat deficient per poder tenir un model 3D de l'arbre acceptable.

L'anàlisi estadística aplicada al núvol de punts de l'MTLS basat en el sensor Kinect2 escanejant a 0,5 km/h es pot veure a la Taula 20.

Taula 20. Anàlisi estadística dels errors absoluts i descompostos del núvol obtingut amb l'MTLS basat en el sensor Kinect2 escanejant a una velocitat d'avanç de 0,5 km/h.

	Error (m)	Error X (m)	Error Y (m)	Error Z (m)
Mitjana	0,035	0,011	0,006	-0,012
Mediana	0,034	0,008	0,006	-0,010
Moda	0,038	0,000	0,009	0,000
Desviació estàndard	0,020	0,024	0,021	0,019
Variància de la mostra	0,000	0,001	0,000	0,000
Curtosi	0,416	1,279	1,336	0,497
Coeficient d'asimetria	0,617	0,501	-0,147	0,026
Rang	0,122	0,216	0,199	0,163
Mínim	0,000	-0,099	-0,098	-0,079
Màxim	0,122	0,117	0,102	0,084
Punts (N)	7.323	7.323	7.323	7.323

L'anàlisi estadística aplicada al núvol de punts de l'MTLS basat en el sensor Kinect escanejant a velocitat alta es pot veure a la Taula 21.

Taula 21. Anàlisi estadística dels errors absoluts i descomposats del núvol obtingut amb l'MTLS basat en el sensor kinect escanejant a una velocitat d'avanç de 0 km/h.

	Error (m)	Error X (m)	Error Y (m)	Error Z (m)
Mitjana	0,032	0,010	0,005	-0,013
Mediana	0,030	0,010	0,006	-0,010
Moda	0,028	0,006	0,007	-0,001
Desviació estàndard	0,021	0,020	0,020	0,018
Variància de la mostra	0,000	0,000	0,000	0,000
Curtosi	0,276	31,144	6,349	0,086
Coefficient d'asimetria	0,309	0,422	-1,180	-0,266
Rang	0,255	0,438	0,238	0,147
Mínim	0,000	-0,205	-0,156	-0,080
Màxim	0,255	0,233	0,082	0,067
Punts (N)	1.505	1.505	1.505	1.505

A la Taula 20 i a la Taula 21 s'observa que la mitjana de l'error del núvol escanejant a 0,5 km/h i del núvol escanejant a 2 km/h és de 3,5 i 3,2 cm, respectivament. En els dos casos la mediana és pròxima a la mitjana, cosa que indica que la tendència central de l'error es situa pròxima a la mitjana. La desviació estàndard està al voltant de 2 cm, per tant l'error es concentra al voltant de la mitjana. El rang varia de 0,12 cm a 0,25 cm escanejant a 0,5 i a 2 km/h, respectivament. El canvi és notable, no obstant, cal tenir en compte que un sol punt outlier podria fer modificar el rang de manera considerable.

A continuació la Figura 48 mostra els histogrames de l'error del sistema MTLS basat en el sensor Kinect2 escanejant a 0,5 km/h i a 2 km/h.

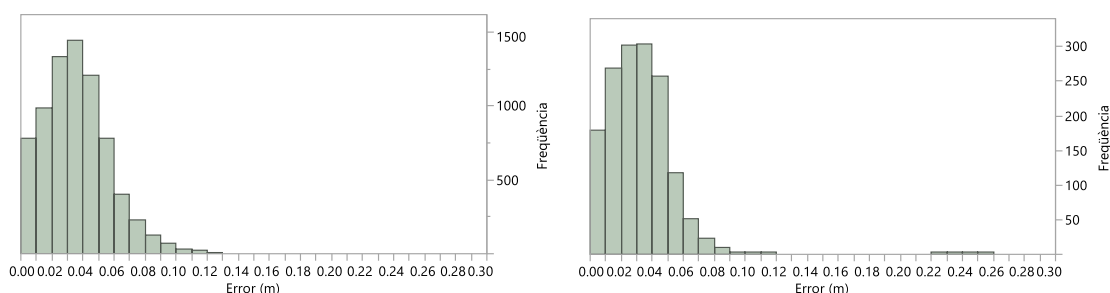


Figura 48. Histograma de l'error del sistema MTLS basat en el sensor Kinect2 escanejant a 0,5 km/h (esquerra) i escanejant a 2 km/h (dreta).

A la Figura 48 s'observa que el pic de l'histograma del núvol obtingut escanejant a 0,5 km/h està situat entre els 3 i 4 cm i que el pic del núvol obtingut escanejant a 2 km/h està situat entre 2 i 4 cm. S'observa que els errors més elevats de 8-9 cm són molt poc

freqüents. Cal destacar que el núvol de punts obtingut escanejant a 2 km/h presenta valors atípics situats entre 22 i 26 cm.

4.2.4 Comparació dels tres MTLs

A continuació es comparen els tres sistemes MTLs basats en el sensor Hokuyo, el sensor Velodyne i el Sensor Kinect2.

La Taula 22 i la Taula 23 mostren un resum de l'anàlisi estadística dels errors absoluts obtinguts amb el sistema MTLs basat en el sensor Hokuyo, Velodyne i Kinect2 escanejant a 0,5 km/h i a 2 km/h, respectivament.

Taula 22. Anàlisi estadística dels errors absoluts obtinguts amb l'MTLs basat en el sensor Hokuyo, el sensor Velodyne i el sensor Kinect2 escanejant a una velocitat d'avanç de 0,5 km/h.

	Error Hokuyo (m)	Error Velodyne (m)	Error Kinect2 (m)
Mitjana	0,066	0,043	0,035
Mediana	0,063	0,043	0,034
Moda	0,051	0,046	0,038
Desviació estàndard	0,034	0,021	0,020
Variància de la mostra	0,001	0,000	0,000
Curtosi	0,683	0,336	0,416
Coeficient d'asimetria	0,685	0,334	0,617
Rang	0,241	0,167	0,122
Mínim	0,000	0,000	0,000
Màxim	0,242	0,167	0,122
Punts (N)	18.741	50.051	7.323

A la Taula 22 s'observa que el sistema que presenta un error més baix és el basat en el sensor Kinect2, seguit del basat en el sensor Velodyne, que presenta un error lleugerament més alt. El sistema basat en el sensor Hokuyo és el que presenta un error més elevat.

Valorant l'error de cada sistema semblaria que el sistema basat amb el Kinect2 seria la millor opció. No obstant, el núvol generat només disposa de 7.323 punts. En canvi, el sistema basat en el sensor Velodyne, que presenta un error lleugerament més elevat, genera un núvol que consta de 50.051 punts. Així doncs, es considera que el núvol generat amb el sistema MTLs basat en el sensor Velodyne és la millor opció.

Taula 23. Anàlisi estadística dels errors absoluts obtinguts amb l'MTLS basat en el sensor Hokuyo, el sensor Velodyne i el sensor Kinect2 escanejant a una velocitat d'avanç de 2 km/h.

	Error Hokuyo (m)	Error Velodyne (m)	Error Kinect2 (m)
Mitjana	0,063	0,044	0,032
Mediana	0,062	0,043	0,030
Moda	0,034	0,042	0,028
Desviació estàndard	0,029	0,022	0,021
Variància de la mostra	0,001	0,000	0,000
Curtosi	-0,219	0,148	0,276
Coefficient d'asimetria	0,184	0,386	0,309
Rang	0,182	0,154	0,255
Mínim	0,000	0,000	0,000
Màxim	0,182	0,154	0,255
Punts (N)	5.228	12.503	1.505

A la Taula 23 s'observa que escanejant a 2 km/h s'obtenen errors molt similars que quan s'escaneja a 0,5 km/h. No obstant, quan s'augmenta la velocitat d'escaneig, es redueix el nombre de punts de manera molt considerable.

Per tal d'analitzar de manera visual els núvols de punts a continuació es representa el conjunt de núvols obtinguts amb el sistema MTLS basat en els diferents sensors (Figura 49).

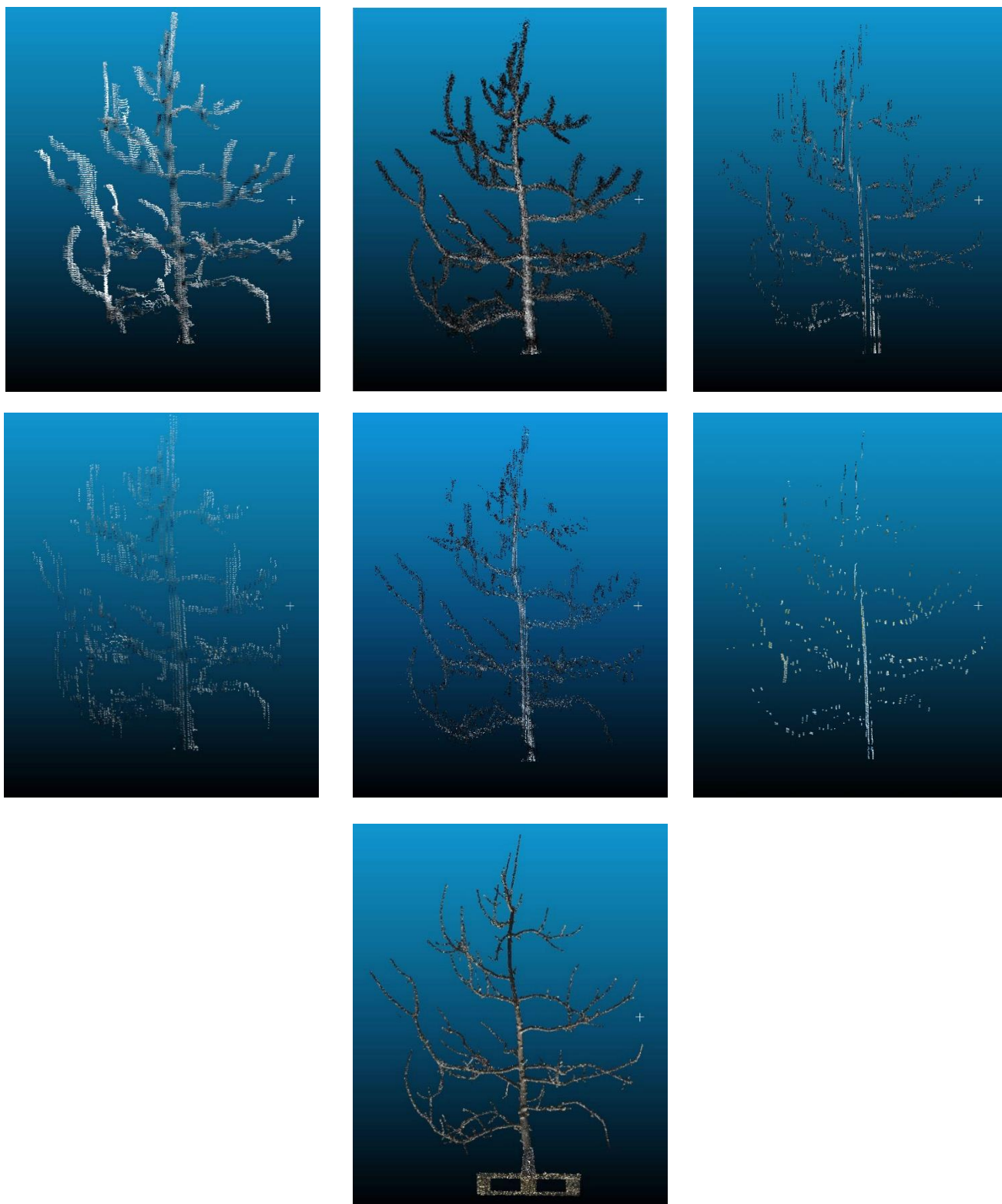


Figura 49. Núvols de punts obtinguts amb el sistema MTLs basat en els diferents sensors. La fila 1 correspon a la velocitat de 0,5 km/h, la fila 2 correspon a 2 km/h i la fila 3 correspon al patró digital 18. La columna 1 correspon al sensor Hokuyo, la columna 2 correspon al sensor Velodyne i la columna 3 correspon al sensor Kinect2.

Per tal d'examinar de manera visual la distribució del conjunt d'errors es realitza el diagrama de caixes (veure Figura 50) dels diferents núvols obtinguts amb els sistemes MTLS basats en cada sensor, escanejant a 0,5 i a 2 km/h.

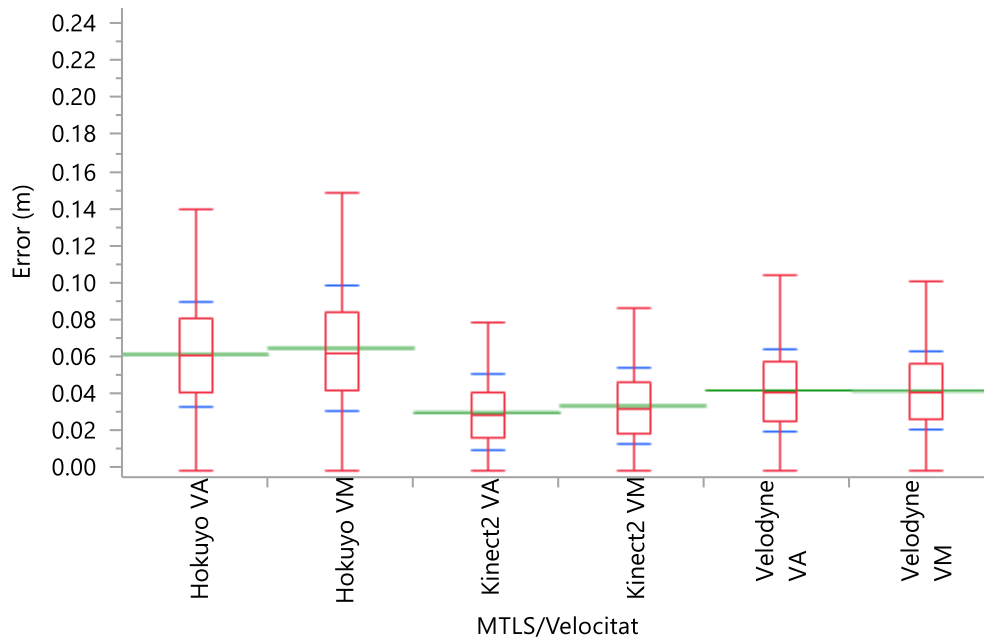


Figura 50. Diagrama de caixes dels diferents núvols obtinguts amb el sistemes MTLS basats en cada sensor a diferents velocitats (VA correspon a 2 km/h i VM correspon a 0,5 km/h).

S'observa que els errors quantificats en l'anàlisi estadística són molt similars per a un sistema MTLS basat en un mateix sensor i no es mostren grans diferències quan s'escaneja a 0,5 o a 2 km/h. El sistema basat en el sensor Kinect2 és el que presenta errors menors i menors dispersions dels errors, i dins d'aquest sensor quan s'escaneja a major velocitat s'obtenen millors resultats.

El diagrama de caixes del sistema MTLS basat en el sensor Velodyne indica que l'error és lleugerament superior que el basat en el sensor Kinect2. El sistema MTLS basat en el sensor Hokuyo presenta uns errors superiors que quan s'usen la resta de sensors. Cap dels tres sistemes MTLS presenten valors atípics.

Per tal de saber com s'agrupen les mitjanes dels diferents sistemes MTLS s'aplica una prova de Tukey-Kramer amb un nivell de significació de 0,05 (veure Taula 24) i s'observa que el sistema MTLS basat en el sensor Velodyne escanejant a 0,5 km/h i escanejant a 2 km/h representen la mateixa població de mostres mentre que les mitjanes de la resta de sensors són significativament diferents.

Taula 24. Separació de mitjanes dels sistemes MTLs basats en els diferents sensors, escanejant a 0,5 i a 2 km/h.

Sensor i velocitat	Mitjana (m)	Desviació estàndard (m)
Hokuyo 0,5 (km/h)	0,066a	0,0285
Hokuyo 2 (km/h)	0,063b	0,0337
Velodyne 0,5 (km/h)	0,043c	0,0203
Velodyne 2 (km/h)	0,044c	0,0205
Kinect2 0,5 (km/h)	0,035d	0,0219
Kinect2 2 (km/h)	0,032e	0,0208

**Lletres diferents en mitjanes impliquen diferències amb un nivell de significació $\alpha=0,05$ segons prova de Tukey-Kramer.*

En l'anàlisi estadística s'ha observat que el que presenta un error menor és el sistema MTLs basat en el sensor Kinect2 escanejant a 2 km/h. No obstant, es descarta que el sistema MTLs basat en el sensor Kinect2 sigui la millor opció ja que presenta una densitat deficient i en l'anàlisi visual s'observa que hi ha branques que no estan ben representades. Es considera que la opció que presenta un escaneig òptim és el sistema MTLs basat en el sensor Velodyne treballant a 0,5 km/h, ja que presenta un error baix, té una densitat de punts elevada i en l'anàlisi visual s'observa que representa l'arbre de manera correcta.

4.3 Estudi econòmic

La Taula 25 i la Taula 26 mostren l'anàlisi de les despeses d'inversió del sistema MTLs basat en el sensor Hokuyo escanejant a 0,5 km/h i escanejant a 2 km/h respectivament. La Figura 51 i la Figura 52 mostren el cost unitari (€/ha) del sistema MTLs basant en el sensor Hokuyo escanejant a 0,5 km/h i a 2 km/h, respectivament.

Taula 25. Anàlisi de les despeses d'inversió del sistema MTLs basat en el sensor Hokuyo escanejant a 0,5 km/h.

t (any)	K (€)	K act. (€)	FC (€)	FC Desc. (€)	FC desc. acum. (€)	Cost unitari (€/ha)
0	-1.710,6	-1.710,6	-61.600	-63.310,6	-63.310,6	-179,9
1	-1.710,6	-1.629,2	-61.600	-60.295,8	-123.606,5	-171,3
2	-1.710,6	-1.551,6	-61.600	-57.424,6	-181.031,1	-163,1
3	-1.710,6	-1.477,7	-61.600	-54.690,1	-235.721,2	-155,4
4	-1.710,6	-1.407,3	-61.600	-52.085,8	-287.807,0	-148,0
5	-1.710,6	-1.340,3	-61.600	-49.605,5	-337.412,5	-140,9
6	-1.710,6	-1.276,5	-61.600	-47.243,4	-384.655,9	-134,2
7	-1.710,6	-1.215,7	-61.600	-44.993,7	-429.649,5	-127,8
VAN costos			-429.649,5			

**On t és el temps, K és el cost, K act. és el cost actualitzat, FC és el flux de caixa, FC desc. és el flux de caixa descomptat i FC desc. acum. és el flux de caixa descomptat acumulat.*

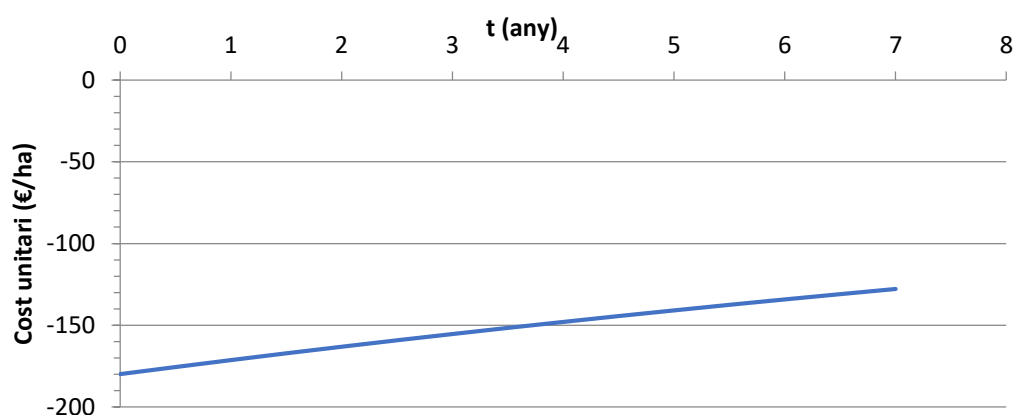


Figura 51. Cost unitari (€/ha) del sistema MTLs basant en el sensor Hokuyo escanejant a 0,5 km/h.

Taula 26. Anàlisi de les despeses d'inversió del sistema MTLs basant en el sensor Hokuyo escanejant a 2 km/h.

t (any)	K (€)	K act. (€)	FC (€)	FC desc. (€)	FC desc. acum. (€)	Cost unitari (€/ha)
0	-1.710,6	-1.710,6	-61.600	-63.310,6	-63.310,6	-45,0
1	-1.710,6	-1.629,2	-61.600	-60.295,8	-123.606,5	-42,8
2	-1.710,6	-1.551,6	-61.600	-57.424,6	-181.031,1	-40,8
3	-1.710,6	-1.477,7	-61.600	-54.690,1	-235.721,2	-38,8
4	-1.710,6	-1.407,3	-61.600	-52.085,8	-287.807,0	-37,0
5	-1.710,6	-1.340,3	-61.600	-49.605,5	-337.412,5	-35,2
6	-1.710,6	-1.276,5	-61.600	-47.243,4	-384.655,9	-33,6
7	-1.710,6	-1.215,7	-61.600	-44.993,7	-429.649,5	-32,0
VAN costos				-429.649,5		

*On t és el temps, K és el cost, K act. és el cost actualitzat, FC és el flux de caixa, FC desc. és el flux de caixa descomptat i FC desc. acum. és el flux de caixa descomptat acumulat.

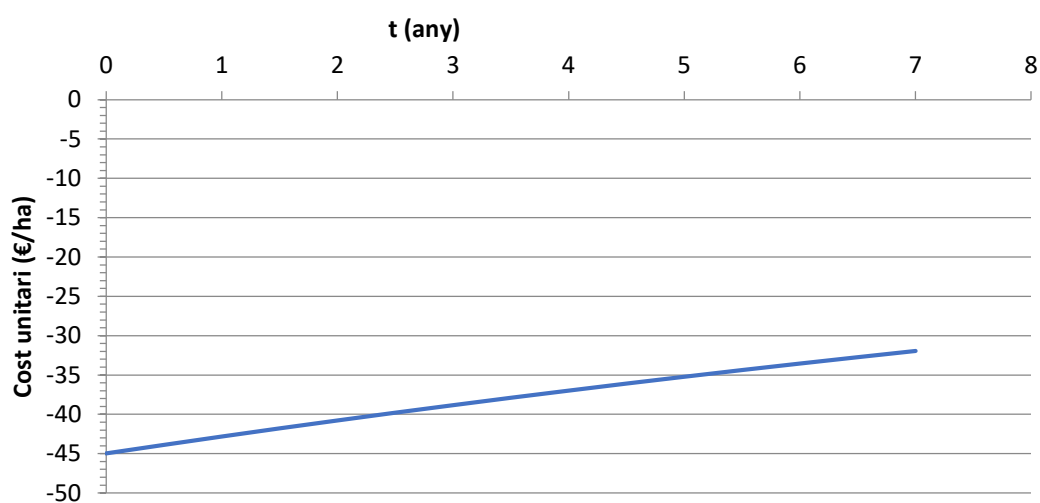


Figura 52. Cost unitari (€/ha) del sistema MTLs basant en el sensor Hokuyo escanejant a 2 km/h.

La Taula 27 i la Taula 28 mostren l'anàlisi de les despeses d'inversió del sistema MTLS basat en el sensor Velodyne escanejant a 0,5 km/h i escanejant a 2 km/h respectivament.

La Figura 53 i la Figura 54 mostren el cost unitari (€/ha) del sistema MTLS basant en el sensor Velodyne escanejant a 0,5 km/h i a 2 km/h, respectivament.

Taula 27. Anàlisi de les despeses d'inversió del sistema MTLS basat en el sensor Velodyne escanejant a 0,5 km/h.

t (any)	K (€)	K act. (€)	FC (€)	FC desc. (€)	FC desc. acum. (€)	Cost unitari (€/ha)
0	-1.900,5	-1.900,5	-61.600	-63.500,5	-63.500,5	-180,4
1	-1.900,5	-1.810,0	-61.600	-60.476,7	-123.977,2	-171,8
2	-1.900,5	-1.723,8	-61.600	-57.596,8	-181.574,0	-163,6
3	-1.900,5	-1.641,7	-61.600	-54.854,1	-236.428,1	-155,8
4	-1.900,5	-1.563,5	-61.600	-52.242,0	-288.670,1	-148,4
5	-1.900,5	-1.489,1	-61.600	-49.754,3	-338.424,4	-141,3
6	-1.900,5	-1.418,2	-61.600	-47.385,1	-385.809,5	-134,6
7	-1.900,5	-1.350,6	-61.600	-45.128,6	-430.938,1	-128,2
VAN costos				-430.938,1		

*On t és el temps, K és el cost, K act. és el cost actualitzat, FC és el flux de caixa, FC desc. és el flux de caixa descomptat i FC desc. acum. és el flux de caixa descomptat acumulat.

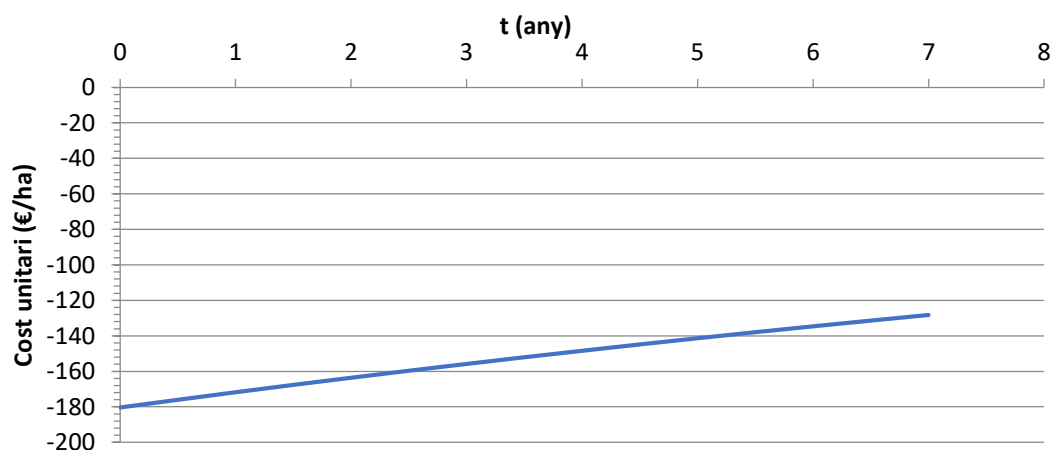
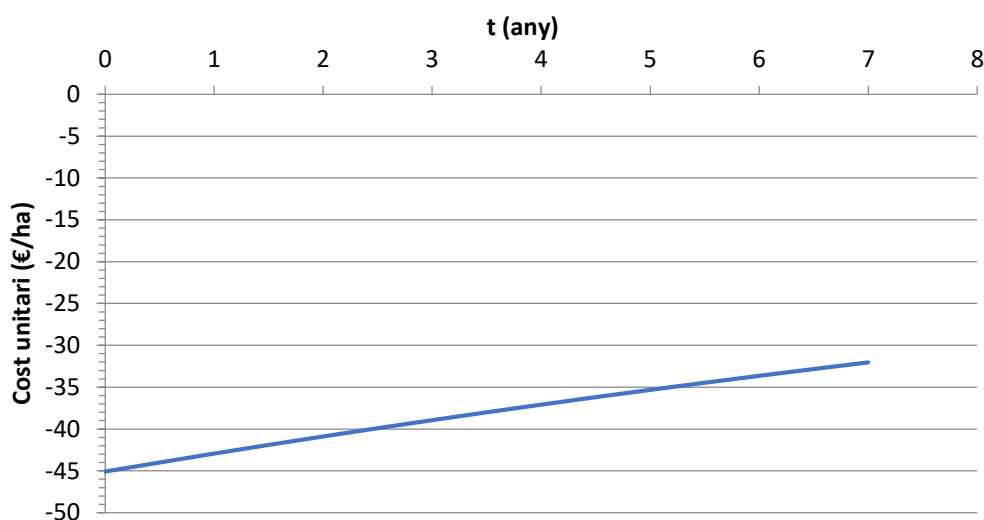


Figura 53. Cost unitari (€/ha) del sistema MTLS basant en el sensor Velodyne escanejant a 0,5 km/h.

Taula 28. Anàlisi de les despeses d'inversió del sistema MTLS basat en el sensor Velodyne escanejant a 2 km/h.

t (any)	K (€)	K act. (€)	FC (€)	FC Desc. (€)	FC desc. acum. (€)	Cost unitari (€/ha)
0	-1.900,5	-1.900,5	-61.600	-63.500,5	-63.500,5	-45,1
1	-1.900,5	-1.810,0	-61.600	-60.476,7	-123.977,2	-43,0
2	-1.900,5	-1.723,8	-61.600	-57.596,8	-181.574,0	-40,9
3	-1.900,5	-1.641,7	-61.600	-54.854,1	-236.428,1	-39,0
4	-1.900,5	-1.563,5	-61.600	-52.242,0	-288.670,1	-37,1
5	-1.900,5	-1.489,1	-61.600	-49.754,3	-338.424,4	-35,3
6	-1.900,5	-1.418,2	-61.600	-47.385,1	-385.809,5	-33,7
7	-1.900,5	-1.350,6	-61.600	-45.128,6	-430.938,1	-32,1
VAN costos				-430.938,1		

*On t és el temps, K és el cost, K act. és el cost actualitzat, FC és el flux de caixa, FC desc. és el flux de caixa descomptat i FC desc. acum. és el flux de caixa descomptat acumulat.

**Figura 54.** Cost unitari (€/ha) del sistema MTLS basant en el sensor Velodyne escanejant a 2 km/h.

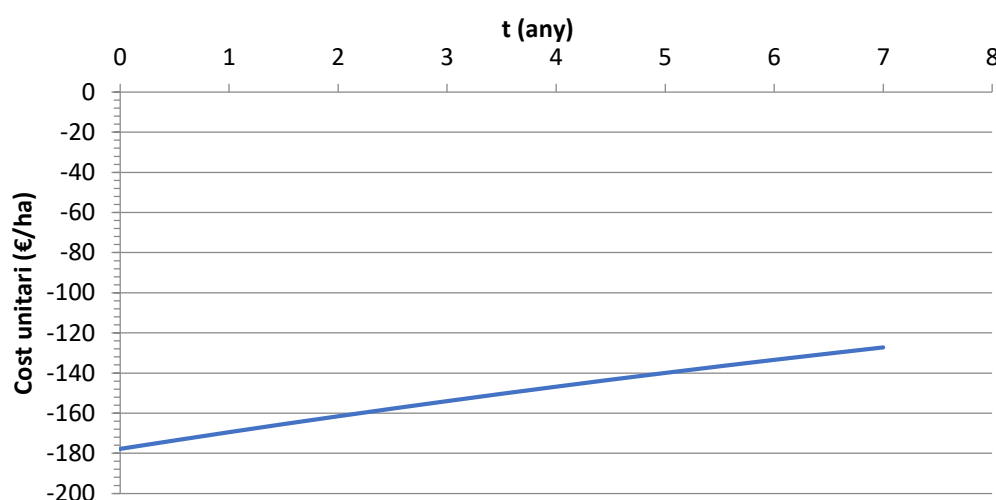
La Taula 29 i la Taula 30 mostren l'anàlisi de les despeses d'inversió del sistema MTLS basat en el sensor Kinect2 escanejant a 0,5 km/h i escanejant a 2 km/h respectivament.

La Figura 55 i la Figura 56 mostren el cost unitari (€/ha) del sistema MTLS basant en el sensor Kinect2 escanejant a 0,5 km/h i a 2 km/h, respectivament.

Taula 29. Anàlisi de les despeses d'inversió del sistema MTLIS basat en el sensor Kinect2 escanejant a 0,5 km/h.

t (any)	K (€)	K act. (€)	FC (€)	FC desc. (€)	FC desc. acum. (€)	Cost unitari (€/ha)
0	-1002,9	-1002,9	-61600	-62602,9	-62602,9	-177,8
1	-1002,9	-955,1	-61600	-59669,5	-122272,4	-169,5
2	-1002,9	-909,6	-61600	-56875,9	-179148,3	-161,6
3	-1002,9	-866,3	-61600	-54215,3	-233363,6	-154,0
4	-1002,9	-825,1	-61600	-51681,3	-285044,9	-146,8
5	-1002,9	-785,8	-61600	-49268,1	-334313,0	-140,0
6	-1002,9	-748,4	-61600	-46969,7	-381282,8	-133,4
7	-1002,9	-712,7	-61600	-44780,8	-426063,6	-127,2
VAN costos				-426063,6		

**On t és el temps, K és el cost, K act. és el cost actualitzat, FC és el flux de caixa, FC desc. és el flux de caixa descomptat i FC desc. acum. és el flux de caixa descomptat acumulat.*

**Figura 55.** Cost unitari (€/ha) del sistema MTLIS basant en el sensor Kinect2 escanejant a 0,5 km/h.**Taula 30.** Anàlisi de les despeses d'inversió del sistema MTLIS basat en el sensor Kinect2 escanejant a 2 km/h.

t (any)	K (€)	K act. (€)	FC (€)	FC desc. (€)	FC desc. acum. (€)	Cost unitari (€/ha)
0	-1002,9	-1002,9	-61600	-62602,9	-62602,9	-44,5
1	-1002,9	-955,12	-61600	-59669,5	-122272,4	-42,4
2	-1002,9	-909,64	-61600	-56875,9	-179148,3	-40,4
3	-1002,9	-866,32	-61600	-54215,3	-233363,6	-38,5
4	-1002,9	-825,07	-61600	-51681,3	-285044,9	-36,7
5	-1002,9	-785,78	-61600	-49268,1	-334313,0	-35,0
6	-1002,9	-748,36	-61600	-46969,7	-381282,8	-33,4
7	-1002,9	-712,72	-61600	-44780,8	-426063,6	-31,8
VAN costos				-426063,6		

**On t és el temps, K és el cost, K act. és el cost actualitzat, FC és el flux de caixa, FC desc. és el flux de caixa descomptat i FC desc. acum. és el flux de caixa descomptat acumulat.*

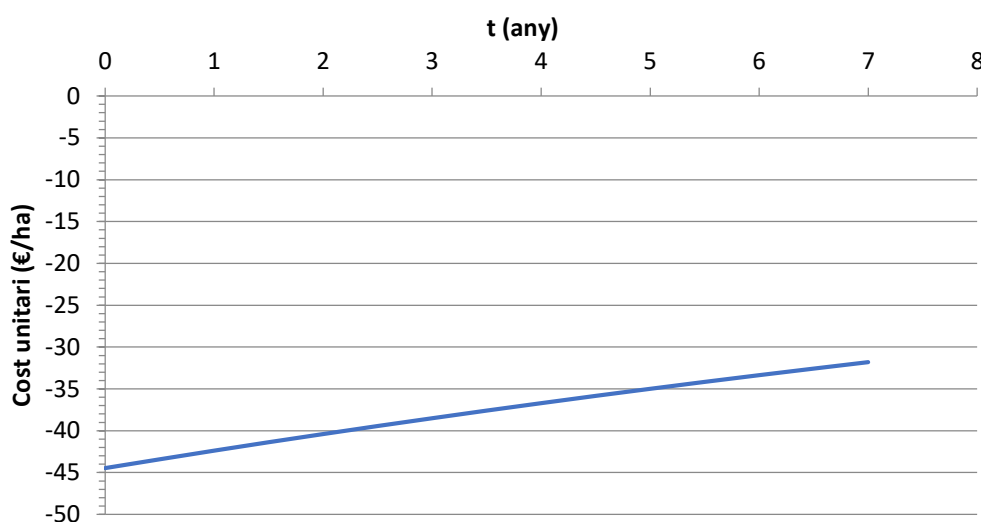


Figura 56. Cost unitari (€/ha) del sistema MTLT basant en el sensor Kinect2 escanejant a 2 km/h.

S'observa que el Valor Actual Net dels costos (VAN costos) d'un mateix sistema MTLT al cap dels 8 anys és el mateix quan es varia la velocitat d'escaneig (0,5 i 2 km/h). Això és lògic ja que és un mateix equip escanejant un mateix nombre d'hores. En canvi, el que varia de manera considerable és el cost unitari (€/ha) de l'escaneig. El cost unitari per a un mateix sistema MTLT escanejant a 2 km/h és quatre vegades més reduït que escanejant a 0,5 km/h.

El sistema MTLT basat en el sensor Kinect 2 és el que presenta un VAN dels costos més reduït. Concretament el sistema MTLT basat en el sensor Kinect 2 representa un estalvi de 3.586 € respecte el sistema MTLT basat en el sensor Hokuyo i un estalvi de 4.874 € respecte el sistema MTLT basat en el sensor Velodyne.

Donat que els costos fixes, corresponents a l'adquisició del sensor, són molt menys determinats que els costos variables, es considera que per a l'elecció del sistema s'ha de considerar la qualitat del núvol de punts 3D generat i no s'ha de tenir en compte el preu d'adquisició del sensor. En canvi, la velocitat d'escaneig sí que es determinant. A l'apartat 4.2.4 s'ha observat que l'escaneig realitzat a 2 km/h presenta errors similars als obtinguts escanejant a 0,5 km/h. No obstant la densitat de punts del núvol 3D és molt menor quan s'escaneja a 2 k/h, per aquest motiu hi ha aplicacions que s'han de realitzar a 0,5 km/h. Sempre que l'ús que fa el pagès o el tècnic del núvol de punts ho permeti l'escaneig s'ha de realitzar a 2 km/h, cosa que fa més econòmica l'operació d'escaneig.

5 Conclusions

S'ha creat i validat un patró digital a partir d'un patró real que comet un error estàndard de - 0,16 mm per als diàmetres i de 0,001 mm per a les longituds. Cal esperar que es deshidrati completament el patró real abans de realitzar l'anàlisi fotogramètrica per obtenir el patró digital. En el procés de deshidratació el patró real varia els diàmetres i el retorciment de les branques.

S'ha desenvolupat una metodologia fiable per a la comparació dels núvols de punts obtinguts amb un sistema MTLs amb el patró digital de referència (validat).

S'han comparat els tres MTLs amb el patró digital creat i s'ha vist que el sistema MTLs basant en el sensor Microsoft Kinect2 és el que presenta un error menor (al voltant de 3,3 cm), seguit del sistema MTLs basat en el sensor Velodyne (al voltant de 4,3 cm) i el que presenta un error major és el sistema MTLs basat en el sensor Hokuyo (al voltant de 6,4 cm). No obstant, el sistema MTLs basat en el sensor Kinect2 presenta una densitat de punts deficient i s'observa que hi ha branques que no estan ben representades. El sistema MTLs basat en el sensor Hokuyo presenta una densitat per sota de la òptima i s'observen alguns errors de representació de les branques. Es considera que el sistema MTLs basat en el sensor Velodyne és la millor opció, ja que a part de tenir un error baix, presenta una alta densitat de punts i no s'observen errors de representació.

S'han comparat els tres sistemes MTLs escanejant a diferents resolucions (0,5 i 2 km/h) i s'ha vist que l'error no presenta variacions significatives (les diferències d'errors es situen entre 1 i 3 mm quan es passa d'escanejar de 0,5 a 2 km/h). No obstant, el canvi en les densitats dels núvols sí que són significatives. Quan s'escaneja a 2 km/h es redueix molt la densitat de punts del núvol. Els núvols obtinguts amb el sistema MTLs basats en el sensor Microsoft Kinect2 presenten una densitat massa baixa escanejant tan a 0,5 com a 2 km/h. Els núvols obtinguts amb el sistema MTLs basat en el sensor Hokuyo presenta una densitat acceptable quan s'escaneja a 0,5 km/h i una densitat baixa quan s'escaneja a 2 km/h. Els núvols obtinguts amb el sistema MTLs basats amb el sensor Velodyne presenten una densitat òptima quan s'escaneja a 0,5 km/h i acceptable quan s'escaneja a 2 km/h.

A nivell econòmic s'ha observat que, quan s'escaneja durant un nombre d'hores elevades, la diferència de costos per hectàrea entre els diferents sistemes MTLs és molt reduïda. En canvi els costos per hectàrea varien de manera molt considerables en funció de la resolució d'escaneig.

En treballs futurs seria interessant trobar un mètode de valorar la qualitat dels núvols de punts obtinguts amb el sistema MTLS en que l'anàlisi visual tingui una menor importància. En treballs futurs també es considera interessant analitzar la reconstrucció dels núvols de l'MTLS basat en el sensor Microsoft Kinect2 a partir de més columnes de píxels o, fins i tot, de tots els 424 píxels de cada fotograma i continuar estudiant perquè hi ha alguns errors que no se sap si són del sistema MTLS o de la reconstrucció dels núvols de punts.

6 Bibliografia

- Auat, F.; Rosell-Polo, J.R.; Gregorio, E.; Andújar, D.; Puigdomènech, L.; Masip, J. i Escolà, A. (2015). «Advances in structured light sensors Applications in precision agriculture and livestock Farming». *Adv. Agron.*, vol. 133, pp. 71-112.
- Bertheloot, J.; Chéné, Y.; Rousseau, D.; Lucidarme, P.; Caffier, V.; Morel, P.; Belin, É. i Chapeau-Blondeau, F. (2012). «On the use of depth camera for 3D phenotyping of entire plants». *Comput. Electron. Agr.*, vol. 82, pp. 122-127.
- Fox, D.; Henry, P.; Krainin, M.; Herbst, E. i Ren, X. (2012). «RGB-D mapping: Using Kinect-style depth cameras for dense 3D modeling of indoor environments». *Int. J. Robot Res.*, vol. 31, no. 5, pp. 647-663.
- Gutierrez A. i Plaza F. (1967). «Características físico-mecánicas de las maderas españolas». Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias, Ministerio de Agricultura.
- Kannan, K. (2016). «Development of a reference software platform for the Velodyne VLP-16 LiDARS». Master's Thesis at KTH Royal Institute of Technology.
- Khoshelham, K. i Elberink, S.O. (2012). «Accuracy and resolution of Kinect depth data for indoor mapping». *Applications. Sens.*, vol. 12, no. 2, pp. 1437-1454.
- Nguyen, T.T.; Vandevoorde, K.; Wouters, N.; Kayacan, E.; De Baerdemaeker, J.G. i Saeys, W. (2016). «Detection of red and bicoloured apples on tree with an RGB-D camera». *Biosyst. Eng.* vol. 146, pp. 33-44.
- Rosell-Polo, J.R.; Gregorio, E.; Gené, J.; Llorens, J.; Torrent, X.; Arnó, J. i Escolà, A. (2017). «Kinect v2 Sensor-based Mobile Terrestrial Laser Scanner for Agricultural Outdoor Applications». *IEEE/ASME Transact. on Mechatr.*, Vol. 22, no. 6, pp. 2240-2427.
- Rosell-Polo, J.R. i Sanz, R. (2012). «A review of methods and applications of the geometric characterization of tree crops in agricultural activities». *Comput. and Electr. in Agri.*, vol. 81, pp. 124-141.

Walklate, P.J., Cross, J.V., Richardson, G.M., Murray, R.A. i Baker, D.E. (2002).
«Comparison of different spray volume deposition models using LIDAR
measurements of apple orchards». *Biosyst. Eng.*, vol. 82, no. 3, pp. 253-267.